
BACHELORARBEIT

Herr
Florian Weise

**Elektromechanische Charak-
terisierung von Bewegungs-
wandlern für die medizinische
Untersuchung**

Mittweida, 2013

BACHELORARBEIT

Elektromechanische Charakterisierung von Bewegungswandlern für die medizinische Untersuchung

Autor:
Herr

Florian Weise

Studiengang:
Physikalische Technik

Seminargruppe:
PT09wM-B

Erstprüfer:
Prof. Dr. Ralf Hinderer

Zweitprüfer:
Dr. Ivo Cermak

Einreichung:
Mittweida, 28. Juni 2013

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2013

Bibliografische Beschreibung:

Weise, Florian:

Elektromechanische Charakterisierung von Bewegungswandlern für die medizinische Untersuchung. - 2013. – 56 Seiten, 33 Abbildungen

Mittweida, Hochschule Mittweida,

Fakultät Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik,

Bachelorarbeit, 2013

Referat:

Die Magnetresonanztomographie ist eine weit entwickelte Form der bildgebenden Diagnostik. Eine neue Entwicklung ist die Elastographie mit der Magnetresonanztomographie zu verbinden. Für diese Einbringung wurde ein Bewegungswandler entwickelt, welcher ein elektrisches Signal in ein mechanisches Signal umwandelt. Dieser Bewegungswandler wurde elektromechanisch charakterisiert. Da der Aufbau des Bewegungswandlers sehr komplex ist, wurde ein elektrodynamischer Lautsprecher für erste Testmessungen verwendet. Der Lautsprecher wurde elektrisch vermessen und elektromechanisch charakterisiert. Für den Bewegungswandler wurde neben der elektrischen Methode noch eine optische Messeinrichtung verwendet.

Title:

The electromechanical characterization of motion transducers for medical examination.

Abstract:

Magnetic resonance imaging is a highly developed form of diagnostic imaging. A new development is the combination of magnetic resonance imaging and elastography. For this development, a motion transducer has been developed which converts an electrical signal into a mechanical signal. The transducer is characterized electromechanically. With the help of an electrical and optical measuring set up the motion transducer is evaluated. Since the structure of the motion transducer is very complex, an electrodynamics loudspeaker was used for initial testing. The speaker was evaluated electrically and characterized electromechanically. For the motion transducer an optical measuring device has been introduced in addition to the electrical method.

Danksagung

Ich bedanke mich bei den Mitarbeitern der Firma CGC Instruments für die tatkräftige Unterstützung. Ein besonderes Dankeschön gilt Herrn Dr. Ivo Cermak, Frau Dr. rer. nat. Iva Cermakova und Herrn Prof. Dr. Ralf Hinderer für die sehr gute Betreuung während meiner Arbeit. Weiterhin bedanke ich mich bei der Arbeitsgruppe MR-Elastographie der Charité Berlin für die Bereitstellung des Bewegungswandlers. Ein großes Dankeschön geht an meine Familie, die mir Unterstützung schenkte und ohne die ich nie so weit gekommen wäre.

Vielen Dank.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einführung	1
1.1 Zielstellung	3
1.2 Motivation	3
2 Grundlagen	5
2.1 Thiele-Small-Parameter	5
2.2 Elektrodynamischer Lautsprecher	6
2.2.1 Aufbau	6
2.2.2 Funktion und Ersatzschaltbilder	7
2.3 Piezoaktor	9
2.3.1 Piezoelektrischer Effekt	9
2.3.2 Aufbau Piezoaktor mit Ersatzschaltbild	10
3 Material und Methoden	13
3.1 Impedanzmessung am elektrodynamischen Lautsprecher	13
3.1.1 Geräte	13
3.1.2 Versuchsaufbau	14
3.1.3 Versuchsdurchführung	15
3.2 Impedanzmessung am Piezoaktor	16
3.2.1 Geräte	16
3.2.2 Versuchsaufbau	17
3.2.3 Versuchsdurchführung	18
3.3 Optische Messung am Piezoaktor	19
3.3.1 Geräte	19
3.3.2 Versuchsaufbau	20
3.3.2.1 Untersuchung der Abhängigkeit der 2. und 3. Oberwelle auf unterschiedliche Amplituden	20

3.3.2.2	Optische Impedanzmessung am Piezoaktor	21
3.3.3	Versuchsdurchführung	21
3.3.3.1	Untersuchung der Abhängigkeit der 2. und 3. Oberschwingung auf unterschiedliche Amplituden	21
3.3.3.2	Optische Impedanzmessung am Piezoaktor	22
4	Ergebnisse	23
4.1	<i>Impedanzmessung am elektrodynamischen Lautsprecher</i>	23
4.1.1	Berechnung der einzelnen Elemente	28
4.2	<i>Impedanzmessung am Piezoaktor</i>	31
4.3	<i>Optische Messung am Piezoaktor</i>	36
4.3.1	Untersuchung der Abhängigkeit der 2. und 3. Oberschwingung auf unterschiedliche Amplituden	36
4.3.2	Optische Impedanzmessung am Piezoaktor	37
5	Diskussion	43
5.1	<i>Impedanzmessung am elektrodynamischen Lautsprecher</i>	43
5.2	<i>Piezoaktor</i>	44
5.2.1	Impedanzmessung am Piezoaktor	44
5.2.2	Optische Messung am Piezoaktor	45
5.2.3	Zusammenfassung der Messungen am Piezoaktor	46
	Literaturverzeichnis	49
	Anlagen	51
	Selbstständigkeitserklärung	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der technischen Umsetzung der Hirn-Magnetresonanzelastographie [URL-9].....	2
Abbildung 2: Aufbau eines elektrodynamischen Lautsprechers [Hausdorf 2005].....	6
Abbildung 3: Ersatzschaltbild eines elektrodynamischen Lautsprechers [URL-2]	7
Abbildung 4: Perowskit-Struktur piezoelektrischer Verbindungen [modifiziert nach Hering, Martin, Stohrer 2012].....	9
Abbildung 5: Piezoelektrische Effekt [Hering, Martin, Stohrer 2012]	10
Abbildung 6: Ersatzschaltbild Piezoaktor elektrisch und mechanisch [URL-10, modifiziert nach URL-11]	11
Abbildung 7: Versuchsaufbau für die Impedanzmessung	14
Abbildung 8: Bedieneroberfläche des Oszilloskops nach LabView	15
Abbildung 9: Versuchsaufbau für eine elektrische Resonanzmessung am Aktor	17
Abbildung 10: Schematischer Aufbau des optischen Messversuchs	20
Abbildung 11: Versuchsaufbau für eine optische Impedanzmessung am Aktor	21
Abbildung 12: Impedanzverlauf des Lautsprechers ohne Zusatzmasse	23
Abbildung 13: Gemessene Impedanzkurve mit Ausgleichskurve für die Messung ohne Zusatzmasse.....	26
Abbildung 14: Impedanzverlauf des Lautsprechers mit Zusatzmasse	27
Abbildung 15: Original gemessene Impedanzkurve mit Ausgleichskurve für die Messung mit Zusatzmasse	28
Abbildung 16: Elektrische Amplitude der unteren Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse.....	31

Abbildung 17: Elektrische Phase der unteren Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse	32
Abbildung 18: Elektrische Amplitude der oberen Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse	32
Abbildung 19: Elektrische Phase der oberen Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse	33
Abbildung 20: Elektrische Amplitude der unteren Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse	33
Abbildung 21: Elektrische Phase der unteren Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse	34
Abbildung 22: Elektrische Amplitude der oberen Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse	34
Abbildung 23: Elektrische Phase der oberen Resonanzmessung mit Zusatzmasse.....	35
Abbildung 24: Optische Amplitude der unteren Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse	37
Abbildung 25: Optische Phase der unteren Resonanzmessung ohne Zusatzmasse	37
Abbildung 26: Optische Amplitude der oberen Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse	38
Abbildung 27: Optische Phase der oberen Resonanzmessung ohne Zusatzmasse	38
Abbildung 28: Optische Amplitude der unteren Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse	39
Abbildung 29: Optische Phase der unteren Resonanzmessung mit Zusatzmasse	39
Abbildung 30: optische Amplitude der oberen Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse	40
Abbildung 31: optische Phase der oberen Resonanzmessung mit Zusatzmasse	40
Abbildung 32: Piezoelement mit Temperatursensor	53

Abbildung 33: Kompletter Bewegungswandler mit Grundplatt	54
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Geräte und Bauteile für die Impedanzmessung	13
Tabelle 2: Geräte für die elektrische Impedanzmessung.....	16
Tabelle 3: Verwendete Geräte und Bauteile für die optische Messung.....	19
Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnung aus Formel 10.....	30
Tabelle 5: Elektrische Resonanzmessung	35
Tabelle 6: Messung der unterschiedlichen Amplituden	36
Tabelle 7: Prozentualer Vergleich zur Grundwelle.....	36
Tabelle 8: Die gemessenen Größen der optischen Resonanzmessung	41
Tabelle 9: Vergleich der gemessenen Resonanzfrequenzen für den Piezoaktor	41

Abkürzungsverzeichnis

CCE	Computer Controlled Elastography
FFT	Fast-Fourier-Transformation (schnelle Fourier Transformation)
FMS	Feder-Masse-System
LD	Laserdiode
MRE	Magnetresonanz-Elastographie
MRT	Magnetresonanztomographie
Pizo	Piezoaktor
PSD	Position Sensing Detector (Positionsdetektor)
PSU	Präzisionsnetzteil
RMS	Root Mean Square (Quadratischer Mittelwert)
TSP	Thiele-Small-Parameter

1 Einführung

Das Abtasten des Körpers mit der Hand ist ein Verfahren, welches von Ärzten schon seit mehreren Jahrtausenden angewendet wird. Dieses Verfahren nennt man Palpation und wird für die Charakterisierung von Druckdolenz, Mobilität, Konsistenz, Elastizität und Dimension angewendet. Für moderne bildgebende Techniken, wie Ultraschall, ist die Palpation eine wichtige Technik. In der Magnetresonanztomographie (MRT) ist die Palpation noch im Anfangsstadium. Bei Ultraschall reguliert der Arzt mit dem Ultraschallkopf die Druckeinwirkung auf das Gewebe. Als weiteres bildgebendes Verfahren ermöglicht die Anwendung eines MRT, die Darstellung von Körperorganen und -geweben. Eine Mischung aus Palpation und MRT bildet die Magnetresonanz-Elastographie (MRE). Der zu untersuchende Bereich wird mit Hilfe von mechanischen Wellen angeregt und kann mit Hilfe eines MRT erfasst und ausgewertet werden. Beim MRT muss die Druckeinwirkung oder Vibration durch ein weiteres Gerät ausgeführt werden. Dies wird mittels eines Bewegungswandlers umgesetzt. Durch die Elastizitätsunterschiede vom gesunden und erkrankten Gewebe kann eine schnelle Diagnose erstellt werden. Das MRT stellt die Elastizitätsunterschiede in Graustufen dar. Das Bild wird erst in einer Auslenkung mit Skalierung im μm -Bereich dargestellt und anschließend in die Druckeinheit kPa umgerechnet. [URL-1, URL-4]

Mit dieser neuen Methode der Bildgebung erhofft man sich eine frühzeitige Erkennung von Karzinomen. Für die Anwendung der MRE werden neben dem Magnetresonanztomographen, ein Wellenformgenerator, ein Audioverstärker und ein Bewegungswandler benötigt (Abbildung 1).

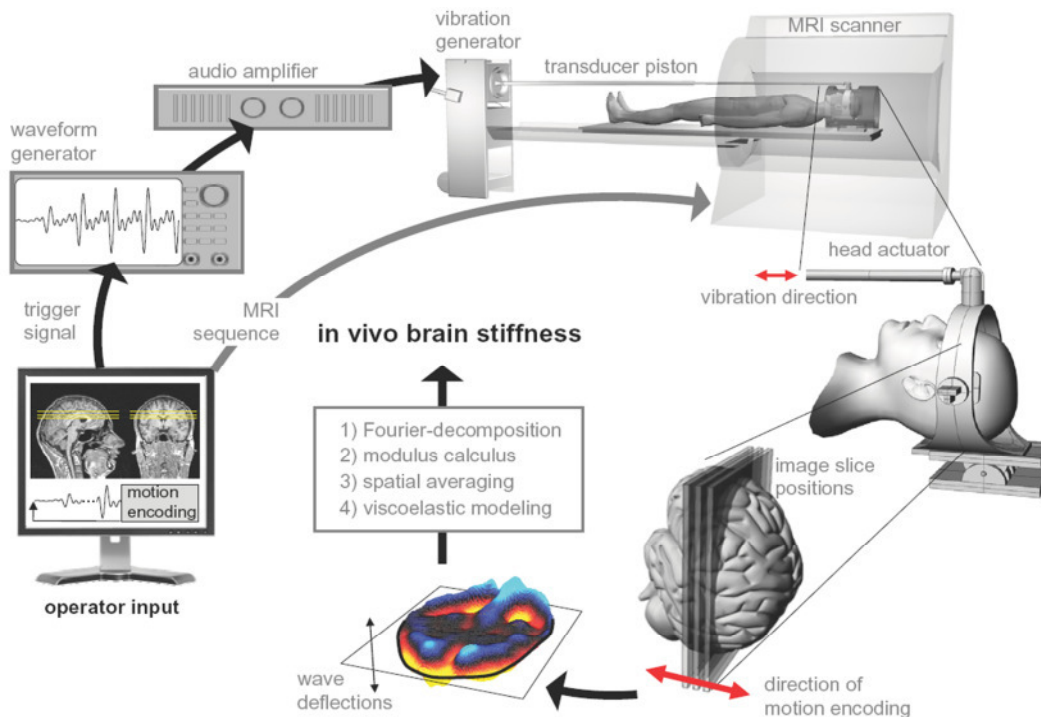


Abbildung 1: Schema der technischen Umsetzung der Hirn-Magnetresonanzelastographie [URL-9]

Der Wellenformgenerator wird für die Bereitstellung einer mechanischen Welle benötigt. Der Audioverstärker verstärkt die Signale, die vom Wellengenerator kommen und zum Bewegungswandler weitergeleitet werden. Der Wellenformgenerator und der Audioverstärker befinden sich nicht im gleichen Raum wie der Bewegungswandler, die Übertragungsstange und der Magnetresonanztomograph, da durch das Magnetfeld des Tomographen dies nicht möglich ist. Das am Bewegungswandler ankommende Signal wird mittels der Übertragungsstange an den Patientenkörper weitergegeben und führt im Körper zu harmonischen Scherwellen oder Druckänderungen, welche durch das MRT aufgenommen und verarbeitet werden. In Zusammenarbeit mit der Charité Berlin entwickelt die Firma CGC Instruments eine Computerkontrollierte Elastographie (CCE). Die Arbeitsgruppe Elastographie der Charité führt Funktionstests am Magnetresonanztomograph durch. Des Weiteren werden Praxistests an Probanden zur Anwendung der CCE an Gehirn und Leber durchgeführt. Die Firma CGC Instruments ist für die Hardware- und Softwareentwicklung der neuen CCE-Einheit zuständig.

1.1 Zielstellung

Die Elastographie als zusätzliche Anwendung für die MRT ist noch in der Entwicklung. Daraus ergibt sich, dass aufgrund verschiedenster Fremdeinwirkungen auf den Patienten keine fehlerfreie Messung möglich ist. Ein Beispiel für Fremdeinwirkung wäre dabei, die durch die Erschütterung des MRT-Scanners ausgelöste Wellenausbreitung im Körper, welche über die Aufhängung der Patientenliege übertragen wird. Neuste Entwicklungen ergaben einen neuen Aufbau der MRE, bei dem der als Bewegungswandler eingesetzte Lautsprecher durch einen Piezoaktor ersetzt wird. Mit diesem können präzise Wellen dargestellt werden. Sein wichtigster Vorteil liegt jedoch in der Abwesenheit von ferromagnetischen Materialien, so dass er gefahrlos nah an den MRT-Scanner angebracht werden kann. Die entstehenden Schwingungen, welche durch den Aktor erzeugt werden, können mittels einer kurzen Übertragungsstange an den Patienten überführt werden. Für die weitere Forschung ist es notwendig zu wissen, welche Bewegung vom Aktor ausgeführt bzw. welche am Patienten ankommt.

1.2 Motivation

Der Piezoaktor steht für aktuelle Versuche zur Verfügung und soll elektromechanisch charakterisiert werden, damit die Übertragung auf den Patienten besser definiert werden kann. Für erste Versuche wurde ein Lautsprecher als Bewegungswandler verwendet, der mit einem Signal angeregt wurde. Dieser wurde in der Vorstudie ebenfalls elektromechanisch charakterisiert und somit konnte die Arbeit am Piezoaktor vorbereitet werden. Für die Messung am Piezoaktor wurde eine optische Messeinrichtung entwickelt, welche das entstehende Signal am Piezoaktor aufnehmen soll. Für die Charité ist es wichtig zu wissen, mit welcher Verzögerungszeit der Aktor mit dem Signalgeber zusammenarbeitet. Anhand dieses Versuchsaufbaus wurde die Auswirkung auf umliegende Gegenstände gemessen. Speziell für den Piezoaktor wurde eine Messeinrichtung entwickelt, welche die Auslenkung des Patienten messen soll. Meine Aufgabenstellung beschäftigte sich mit der elektromechanischen Charakterisierung des Piezoaktors. Dabei wurde die Bewegung des Aktors und des Lautsprechers, welcher im Praktikum schon elektromechanisch charakterisiert wurde, mit der optischen Messeinrichtung vermessen.

2 Grundlagen

2.1 Thiele-Small-Parameter

Für die Arbeit am Piezoaktor wurde ein elektrodynamischer Lautsprecher in einer Vorstudie elektromechanisch charakterisiert. Dieser wurde als einfaches Modell für Aufbau und Verwendung im Vergleich zum Piezoaktor genutzt. Für die elektromechanische Charakterisierung wurden die Thiele-Small-Parameter (TSP) verwendet. Entwickelt wurden diese Parameter von A. N. Thiele und R. H. Small. Der wichtigste Parameter für die Charakterisierung ist die Resonanzfrequenz (F_s). Diese bezeichnet jene Frequenz, an welcher der Lautsprecher sein erstes Impedanzmaximum erreicht und wird in Hz angegeben. Weitere Parameter, die für eine Charakterisierung benötigt werden, sind: die Güteparameter und die Steifheit des elektrodynamischen Lautsprechers. Anhand der effektiven Membranfläche und der Nachgiebigkeit der Membranspannung lässt sich das äquivalente Luftnachgiebigkeitsvolumen V_{AS} berechnen, welches entsprechend in Liter gemessen wird. Die Steifheit C_{ms} , der mechanischen Aufhängung des Lautsprechers wird in m/N (Meter pro Newton) angegeben. Die Q-Werte bezeichnen Güteparameter des Lautsprechers. Q_{ms} spiegelt die mechanische Güte wieder und ist abhängig von der mechanischen Aufhängung. Dabei werden die Komponenten Sicke und Zentrierspinne als Feder betrachtet. Der Güteparameter Q_{es} stellt die elektrische Güte dar und ist abhängig von der elektrischen Ansteuerung. Im Lautsprecher sind dafür die Schwingspule und der Magnet verantwortlich. Q_{ts} bezeichnet die Gesamtgüte des Treibers und leitet sich aus der mechanischen und elektrischen Güte ab. Diese Parameter sind die wichtigsten der TSP, weitere Hilfsgrößen sind: Gleichstromwiderstand (R_e), Schwingspulen-Induktivität (L_e), Membranverschiebungsvolumen (V_d), Kraftfaktor ($B \times L$), bewegte Masse (M_{md}), effektiv bewegte Masse (M_{ms}), mechanische Verluste (R_{ms}), Efficiency-Bandwidth Product (EBP), Membranhub (X_{max} und X_{mech}), Membranfläche (S_d), Impedanz (Z), Übertragungsbereich, Leistung (P_e) und Empfindlichkeit/Schalldruckpegel. [URL-2,URL-3]

2.2 Elektrodynamischer Lautsprecher

2.2.1 Aufbau

Der elektrodynamische Lautsprecher (Abbildung 2) besteht aus den Komponenten Sicke, Membran, Zentriermembran, Staubschutzkalotte, Korb, Ringmagnet, Schwingspule, Impedanzkontrollring, Polkern und Polplatte. Membran, Zentrierspinne, Kalotte und Sicke stellen dabei die beweglichen Bauteile eines Lautsprechers dar. Für den Antrieb verantwortlich sind: Dauermagnet und Schwingspule. Zur Stabilisierung des Lautsprechers dient ein Korb. Die beweglichen Bauteile sind über Sicke am oberen Teil bzw. über Zentriermembran am unteren Teil des Korbes befestigt. Die Kalotte und die Sicke verhindern das Eintreten von Staubteilchen und Schmutz in das Innere des Lautsprechers. Die Schwingspule ist mit der Membran über den Schwingspulenträger verbunden. Die Schwingspule befindet sich im Magnetfeld des Dauermagneten zwischen welchen ein kleiner Luftspalt liegt um Reibung zu vermeiden. Der Magnet ist fest mit dem Polkern und dem Korb verbunden. Am äußeren Teil des Korbes befinden sich die Signalanschlüsse, welche gleichzeitig das Ende der Schwingspule sind. [URL-10]

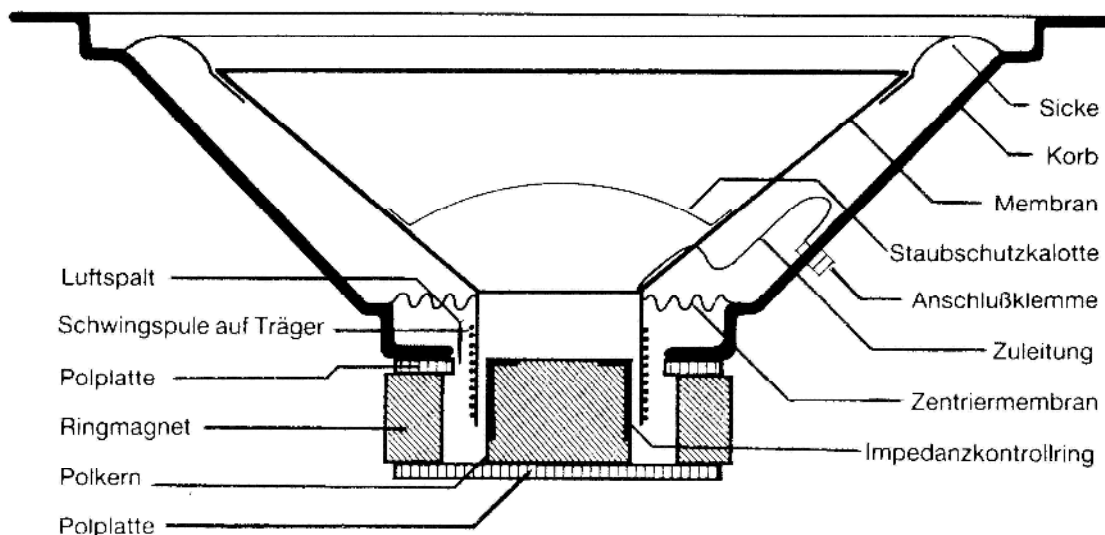


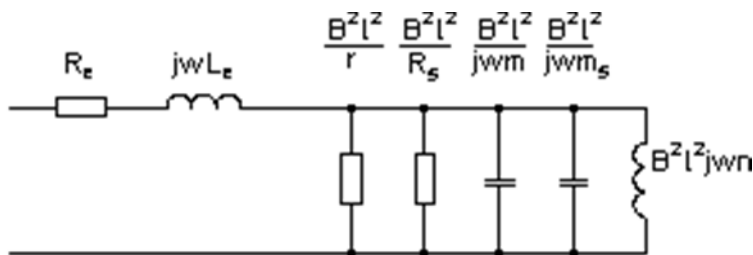
Abbildung 2: Aufbau eines elektrodynamischen Lautsprechers [Hausdorf 2005]

2.2.2 Funktion und Ersatzschaltbilder

Der elektrodynamische Lautsprecher besitzt einen zentralen Antrieb, welcher die Lorenzkraft als Kraftquelle nutzt. Dazu werden ein Dauermagnet (Permanentmagnet) und eine mit Strom durchflossene Spule benötigt. Der durchfließende Strom der Spule und das magnetische Gleichfeld legen zusammen mit der Steifheit C_{ms} , der mechanischen Aufhängung, die Auslenkung der Membran im Lautsprecher fest. Die Lorenzkraft wird durch die Formel (1) bestimmt. Über die Membran kann die Auslenkung der Spule an die Luft abgegeben werden. Somit erfolgt der Übergang von einem elektrischen Signal in ein mechanisches und folglich ein akustisches Signal. [URL-5]

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{l} \quad (1)$$

a)



b)

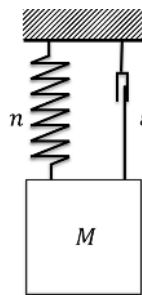


Abbildung 3: Ersatzschaltbild eines elektrodynamischen Lautsprechers [URL-2]

Die Abbildung zeigt ein vereinfachtes Ersatzschaltbild für einen elektrodynamischen Lautsprecher. Mechanische Größen sind Kraftfaktor, Masse, Federhärte und Reibung. Die elektrischen Größen sind Spannung, Strom, Induktivität, Kapazität und Widerstand. Das linke Bild (a) zeigt den elektrischen Aufbau. Auf der rechten Seite in Bild (b) wird der mechanische Aufbau eines elektrodynamischen Lautsprechers dargestellt.

Die Ersatzschaltbilder in Abbildung 3 zeigen zum einen die Realisierung in der Elektronik und zum anderen die vereinfachte Darstellung in der Mechanik. Das elektronische Ersatzschaltbild zeigt einen seriell geschalteten Widerstand R_e und Spule L_e . Aufgrund der aufgewickelten Schwingspule ist der Widerstand R_e konstant vorhanden. Die Spule L_e bezeichnet den komplexen Widerstand des ruhenden Lautsprechers und wirkt mit ihrer Induktion nur oberhalb der ersten Impedanz. Die parallel geschalteten Widerstände, Kondensatoren sowie Spulen repräsentieren den mechanischen Anteil des Lautsprechers. Hier kann das in Abbildung 3b dargestellte Feder-Masse-System (FMS) als Vergleich aus der Mechanik helfen. Für die Berechnung werden zwei Widerstände und Kondensatoren, welche parallel geschaltet sind, zu einem Widerstand und einem Kondensator zusammengefasst. In der Berechnung werden somit r und R_s zu einem Widerstand und m und m_s zu einem Kondensator vereinigt, wodurch R_s und r als ϵ vereinfacht dargestellt werden. Für die Größen m und m_s wird das Symbol M_{ms} verwendet. Fast man die beiden Bilder

zusammen, dann ist der Kondensator mit m und m_s der elektrische Vergleich zur mechanischen Masse im FMS. Der Widerstand ε entspricht der Reibung des FMS und die Spule n gleicht der Federnachgiebigkeit im FSM. Bl steht für den Kraftfaktor des elektrodynamischen Lautsprechers, r für die Reibung und R_s für den Widerstand der bewegenden Bauteile. Die Membranmasse m , die mitschwingende Mediummasse m_s und die Federnachgiebigkeit der Membran und des Gehäuses sind komplexe Widerstände des elektrodynamischen Lautsprechers. [URL-2]

2.3 Piezoaktor

2.3.1 Piezoelektrischer Effekt

Der piezoelektrische Effekt wurde im Jahr 1880 durch die Geschwister Curie entdeckt. Dabei wird ein Werkstoff mit einer Perowskit-Struktur unter Druck gesetzt und eine elektrische Spannung erzeugt. Der Werkstoff, welcher diesen Effekt aufweist, setzt sich sowohl aus einem zweiwertigen Element A^{2+} als auch, einem vierwertigen Element B^{4+} und Sauerstoff O_3^{2-} zusammen. Der Effekt kann sich nur unterhalb der ferroelektrischen Curie-Temperatur einstellen. Diese Temperaturschwelle beschreibt den Punkt an dem die Verbindung von der tetragonalen in die kubische Struktur wechselt (Abbildung 4). In der tetragonalen Struktur sind die Abstände zwischen den positiven und negativen Ladungen verschoben, wodurch sich ein elektrisches Dipolmoment einstellt. Beim Piezoeffekt gibt es drei praktisch verwendbare Abläufe: Längs-, Quer- und Scher-Effekt. Beim Längs-Effekt wird eine Polarisierung durch Krafteinwirkung ausgelöst und wodurch eine Spannung in gleicher Richtung erfolgt. Der Quer-Effekt wird durch die Krafteinwirkung eine transversale Polarisierung und der daraus entstehenden Querspannung geschaffen. Beim Scher-Effekt verursacht die Krafteinwirkung eine diagonal wirkende Polarisierung und damit eine Querspannung (Abbildung 5).

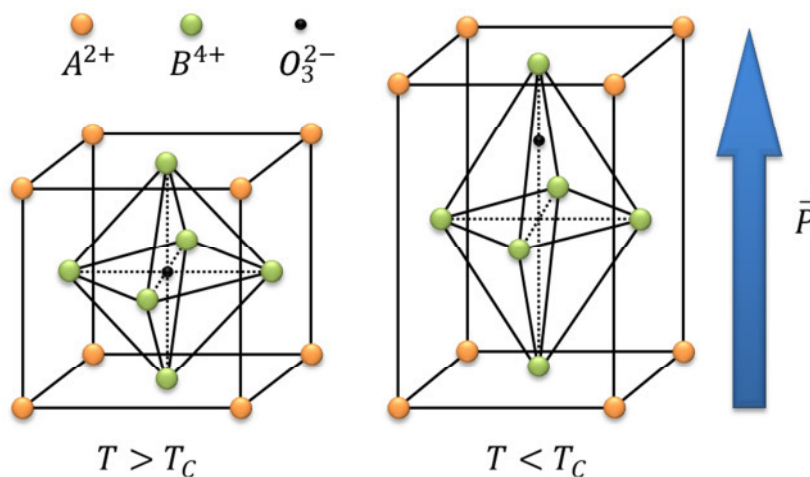


Abbildung 4: Perowskit-Struktur piezoelektrischer Verbindungen [modifiziert nach Hering, Martin, Stohrer 2012]

Die kubische (linke Seite) und tetragonale (rechte Seite) Struktur eines Piezokristalls mit der elektrischen Polarisierung.

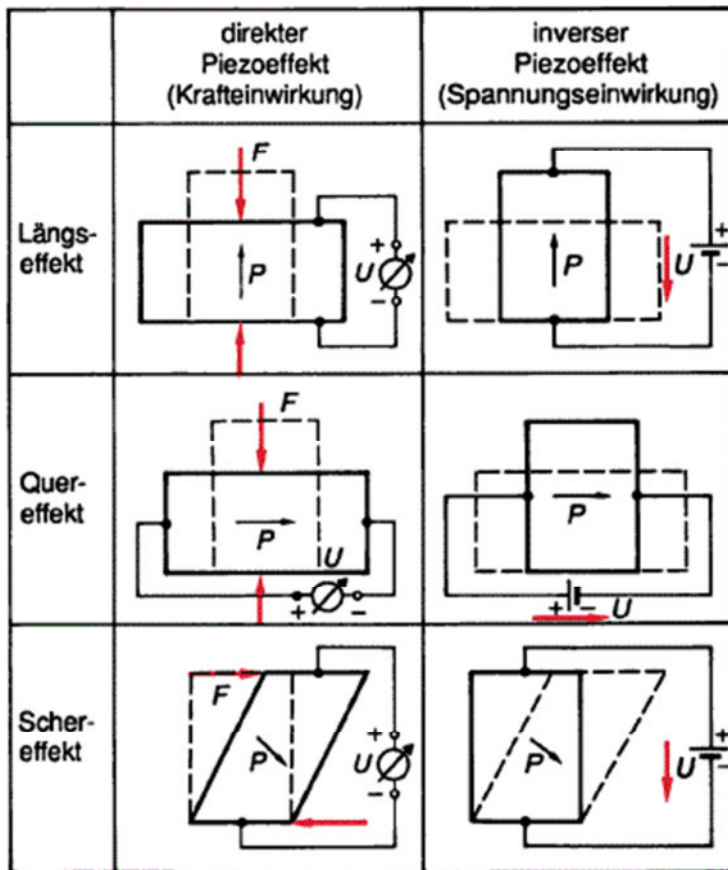


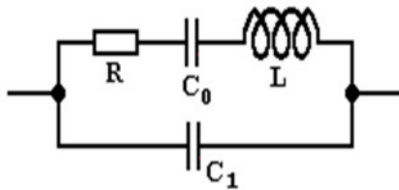
Abbildung 5: Piezoelektrische Effekt [Hering, Martin, Stohrer 2012]

Die technischen Verwendungszwecke eines Piezokristalls und die Antwort des Kristalls auf eine angelegte elektrische Spannung oder auf einwirkenden Druck.

2.3.2 Aufbau Piezoaktor mit Ersatzschaltbild

Der Piezoaktor besteht aus einem mechanischen Anteil und dem Piezoelement als Wandler. Das Piezoelement wird von der Firma Piezosystem Jena aus der Serie PAHL 180/20 geliefert. Der Piezoaktor (kurz: Piezo) weist einen Durchmesser von 20 mm und eine Länge von 180 mm auf. Das Element erreicht einen Hub von bis zu 180 μm und hält dabei eine Last von 3500 N aus. Die Kapazität des Piezos liegt bei 63 μF , wobei die Resonanzfrequenz bei von 2 kHz liegt. Die Betriebsspannung liegt zwischen -10 bis +150 V. Durch die multilayer Technologie des Piezoelementes können die hohen Kräfte im Kilonewton-Bereich realisiert werden. Mit einer Vorspannung von 350 N können auch Zugkräfte realisiert werden. Somit ist der Piezo optimal für den dynamischen Betrieb in der MR-Elastographie geeignet. [URL-9]

a)



b)

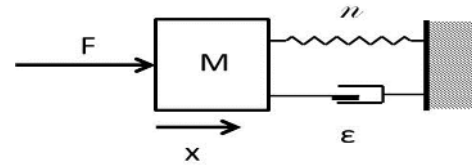


Abbildung 6: Ersatzschaltbild Piezoaktor elektrisch und mechanisch [URL-10, modifiziert nach URL-11]

Abbildung a) spiegelt das elektrische Ersatzschaltbild eines Piezoaktors wieder, wohingegen Abbildung b) das mechanische Ersatzschaltbild eines Piezoaktors veranschaulicht.

Der Piezoaktor wird in der Mechanik als Feder-Masse-System und in der Elektronik als Schwingkreis mit einem parallel geschalteten Kondensator veranschaulicht. Der Schwingkreis besteht aus einem Widerstand, ein Kondensator und einer Spule, welche seriell zu einander geschaltet sind. Der Kondensator C_1 ist die Kapazität des Piezobausteins, welcher auch wirkt wenn der Kristall mit einer Last betrieben wird. Im Feder-Masse-System spiegelt die Masse m für die Spule, die Reibung für den Widerstand und die Federkraft D für den Kondensator C_0 wieder.

3 Material und Methoden

Im folgenden Kapitel werden die Materialien und Methoden, welche für die Messungen am elektrodynamischen Lautsprecher und am Piezoaktor verwendet und angewandt wurden vorgestellt und erläutert.

3.1 Impedanzmessung am elektrodynamischen Lautsprecher

3.1.1 Geräte

Die Tabelle 1 zeigt alle benötigten Geräte für die Messung und ihre Details, wie zum Beispiel die Größe von $1\text{ k}\Omega$ für den verwendeten Vorwiderstand. Mit diesen Geräten und Bauteilen wurde die Messung aufgebaut und durchgeführt. Folgende Programme wurden für die Auswertung verwendet: SigmaPlot 2001 für Windows Version 7.0 und Microsoft Excel 97 bzw. 2010 sowie für die schriftliche Ausarbeitung Microsoft Word 97 bzw. 2010. Als Formeleditor wurde Mathcad 4.0 verwendet.

Tabelle 1: Verwendete Geräte und Bauteile für die Impedanzmessung

Gerät	Bezeichnung	Details	Firma
elektrodynamischer Lautsprecher	Tesla ARN 664	Tieftonlautsprecher mit 10 W und $4\ \Omega$	Tesla
Generator	ETC M631	25 MHz 2-Kanal Digital- Funktionsgenerator	ETC s.r.o.
Oszilloskop	ETC M621	150 MHz 2-Kanal Digital- Speicher-Oszilloskop	ETC s.r.o.
Vorwiderstand	R	$1\text{ k}\Omega$	Reichelt(Lieferant)
Verstärker	A	Verstärkung: 11	CGC Instruments

3.1.2 Versuchsaufbau

Die Messung der Thiele-Small Parameter erfolgte mit einem Tieftonlautsprecher des Herstellers Tesla, dieser mit seiner niedrigen Resonanzfrequenz gut vergleichbar mit der des Piezoaktors ist. Weiterhin wurden ein Oszilloskop, Vorwiderstand, Signalverstärker und Wellenformgenerator benötigt. Mit dem Generator wurde ein Signal nach dem Nyquist-Shannonschen Abtasttheorem erzeugt. Das Nyquist-Shannonsche Abtasttheorem besagt, dass bei einer Frequenz des Messsignals von f_{\max} mit einer Abtaste von mindestens $2 \cdot f_{\max}$ gemessen werden soll, damit das gemessene Signal rekonstruiert werden kann. Das Digital-Speicher-Oszilloskop nimmt das Signal des Lautsprechers und des Generators auf und speichert die gemessenen Daten in Tabellenform ab. Die abgespeicherten Daten wurden mit Excel bzw. SigmaPlot ausgewertet und weiter verarbeitet. Damit das Signal des Lautsprechers für das Oszilloskop messbar ist, wurde ein Verstärker dazwischen geschaltet, welcher eine Verstärkung von 11 besitzt. Für die Darstellung der gemessenen Spannungen über das Oszilloskop wurde ein Computer benötigt. Sowohl Oszilloskop und Generator wurden computergestützt gesteuert. Das Oszilloskop setzt zwei Referenzspannungen in die Impedanz des Lautsprechers um, welche in einem Kurverlauf auf dem Bildschirm des Computers ausgegeben wurde. [URL-6, URL-7]

Aufbau:

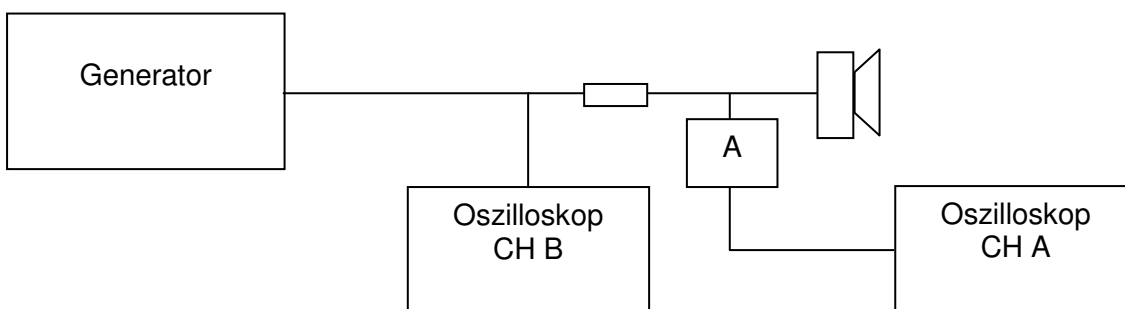


Abbildung 7: Versuchsaufbau für die Impedanzmessung

Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau der Schaltung mit den einzelnen Kanälen des Oszilloskops und die Einbringung des Vorwiderstandes sowie des Verstärkers. Der B-Kanal greift das Ausgangssignal des Generators ab und der A-Kanal das des Lautsprechers, wobei hier noch ein Verstärker seriell geschaltet wurde. Für den Vergleich der Resonanzfrequenz und den Einfluss auf die einzelnen Bauteile wurde eine Zusatzmasse von $m=14,7$ g an die Membran angebracht und die Messung wurde wiederholt.

3.1.3 Versuchsdurchführung

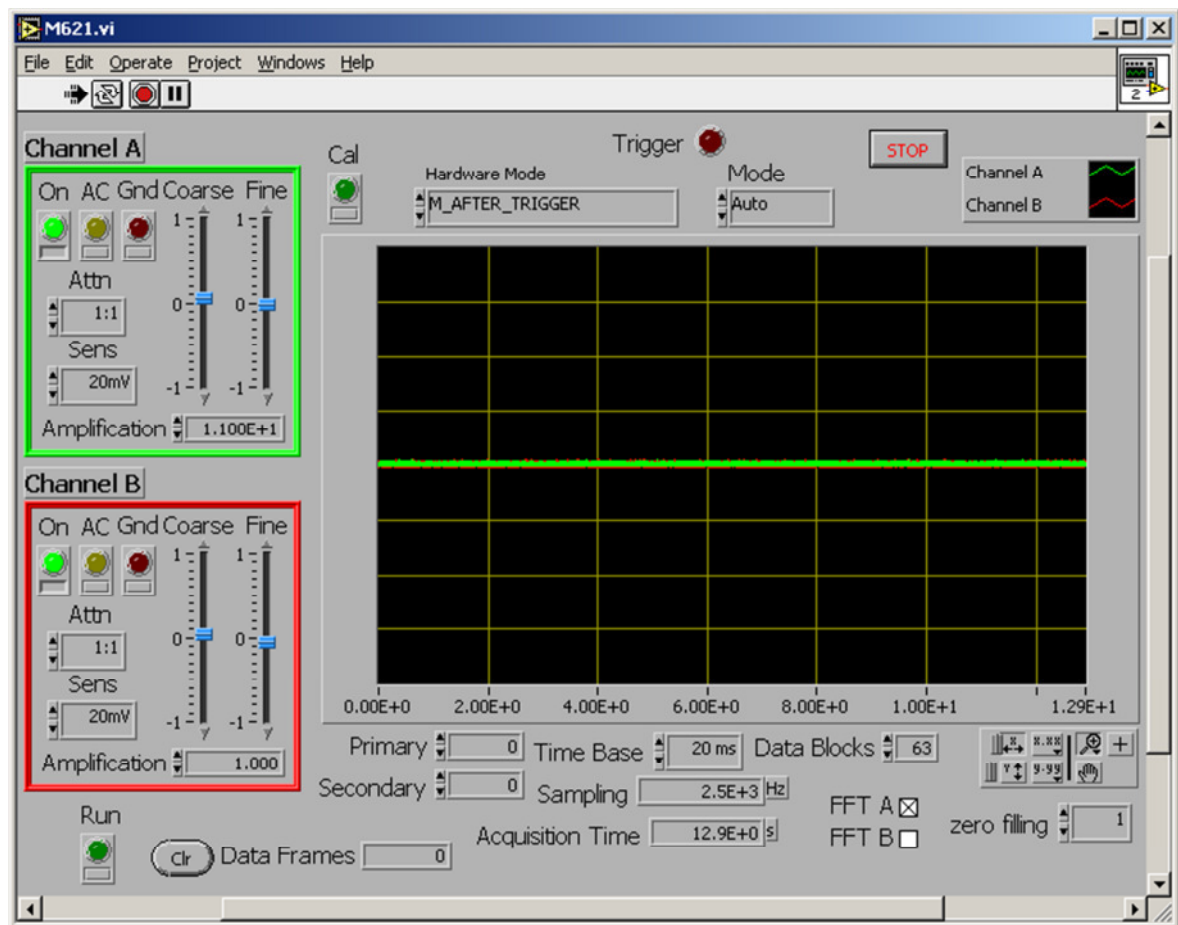


Abbildung 8: Bedieneroberfläche des Oszilloskops nach LabView

Für die erste Resonanzmessung des Lautsprechers wurde der Lautsprecher seriell mit dem Vorwiderstand und Generator verbunden. Der Kanal B des Oszilloskops wurde auf das Ausgangssignal des Generators geschlossen und der Kanal A auf den des Lautsprechers. Mit dem Generator wurde ein Rauschsignal generiert, dessen Spektrum sich von 0 bis 20% der Nyquist-Frequenz erstreckt. Das Rauschsignal wurde ausgewählt, da hier alle Frequenzen gleich generiert werden und nicht alle Frequenzen einzeln angesteuert werden müssen. Die Nyquist-Frequenz gleicht der halben Abtastfrequenz (siehe oben) und wurde für die Messung auf 1 kHz eingestellt, so dass sich der Messbereich zwischen 0 und 200 Hz befindet. Danach wurde der Verstärker mit seiner Betriebsspannung versorgt um die Messung zu starten. Am Oszilloskop (siehe Abbildung 8) wurden beide Kanäle für die Darstellung und Aufzeichnung der Messdaten ausgewählt. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt mit einer Abtastrate von 2,5 kHz. Die Aufnahmezeit betrug 12,9 s. Jede einzelne Aufnahme wurde ca. 100-mal wiederholt und gemittelt, um ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen. Dieser Messversuch wurde dann noch einmal mit dem angebrachten Zusatzmasse von $m=147\text{ g}$ auf der Membran wiederholt.

Die Messdaten wurden über ein FFT-Diagramm (Fast-Fourier-Transformation) dargestellt und die Messpunkte wurden in einer Tabelle abgespeichert. Das FFT-Diagramm hat die Daten des Ausgangssignals welche vom Generator ausgingen mit dem Signal des Lautsprechers verglichen und verarbeitet.

3.2 Impedanzmessung am Piezoaktor

3.2.1 Geräte

Die Tabelle 2 listet alle Geräte und Bauteile, die für den Versuch benötigt wurden, auf. Für die Messung wurden 2 unterschiedliche Verstärkungen verwendet, da das Signal-Rausch-Verhältnis veränderte und durch die Verstärker angepasst wurde.

Tabelle 2: Geräte für die elektrische Impedanzmessung

Gerät	Bezeichnung	Details	Firma
Piezoaktor	PAHL 180/20	Hochlast-Stapeltranslatoren mit mechanischer Vorspannung	Piezosysteme Jena
Generator	ETC M631	25 MHz 2-Kanal Digital-Funktionsgenerator	ETC s.r.o.
Oszilloskop	ETC M621	150 MHz 2-Kanal Digital-Speicher-Oszilloskop	ETC s.r.o.
Verstärker	A	Verstärkung 16 oder 101	CGC Instruments
Präzisionsnetzteil (PSU)	HVS4	0-150 V	CGC Instruments
Widerstand	R1	10 k Ω	Reichelt (Lieferant)
Widerstand	R2	51 k Ω	Reichelt (Lieferant)
Widerstand	R3	3 k Ω	Reichelt (Lieferant)
Kondensator	C1	10 μ F / 100 V	Reichelt (Lieferant)
Kondensator	C2	330 μ F / 450 V	Reichelt (Lieferant)

3.2.2 Versuchsaufbau

Die Abbildung 9 zeigt den Schaltplan für die elektrische Resonanzmessung am Aktor. Mit dem PSU wurde die Grundspannung von 70 V für den Piezoaktor eingestellt. Mit R3 und C2 wurde ein Tiefpass nach dem PSU eingebaut und seriell wurde der Widerstand R2 zusätzlich eingefügt. Zum Ausgangskanal CH A des M631 wurde der Kondensator C3 parallel geschlossen, welcher mit dem Innenwiderstand des Generators einen Tiefpass bildete. Danach wurde ein Widerstand mit einem Kondensator in Reihe geschaltet und mit der Spannungsversorgung durch das PSU an den Aktor angeschlossen. Mit dem Oszilloskop M621 wurde einmal das Signal vom M631 nach dem Kondensator C3 abgegriffen und über dem Kanal CH B am M621 dargestellt. Das Signal des Aktors wurde mit Hilfe eines Verstärkers aufgebessert und über den Kanal CH A dargestellt. Die Spannung am Aktor wurde des Weiteren mit einem Multimeter in geringen zeitlichen Abständen überprüft.

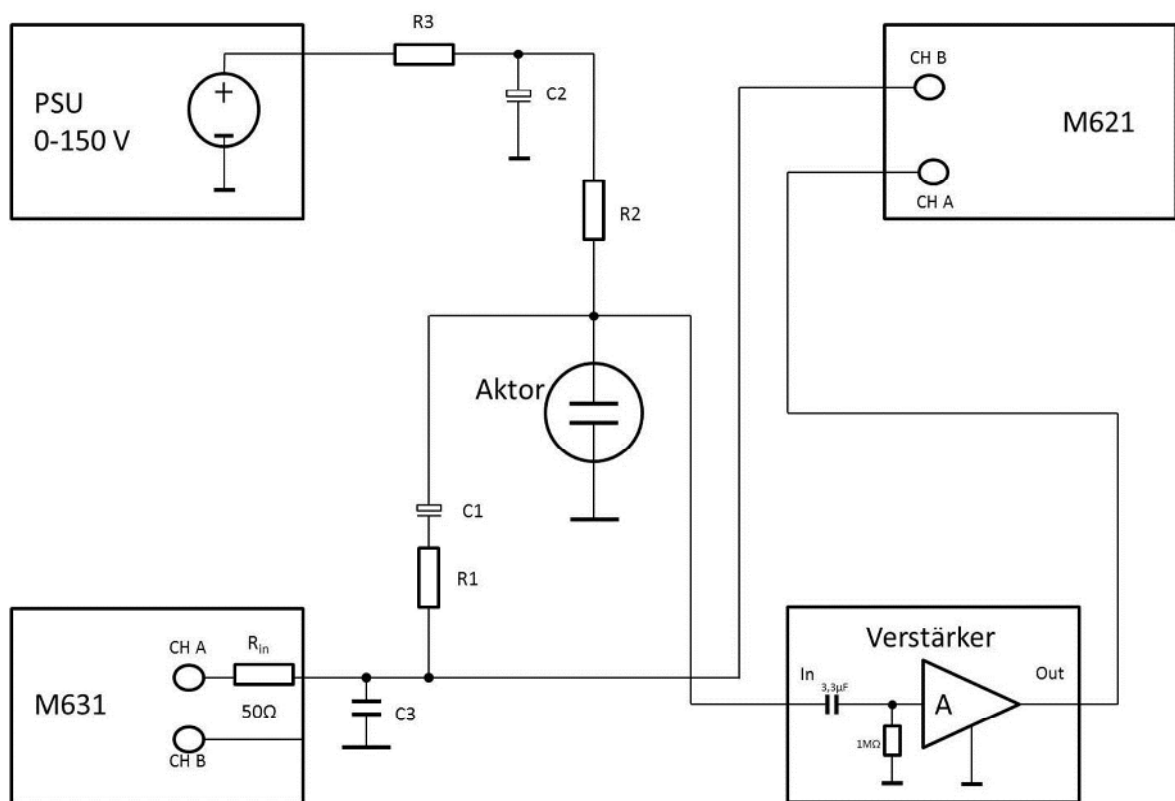


Abbildung 9: Versuchsaufbau für eine elektrische Resonanzmessung am Aktor

Die Abbildung zeigt den Schaltplan für die elektrische Resonanzmessung am Aktor. Das PSU stellt die Grundspannung des Aktors bereit. Das M631 ist der Generator mit dem ein Rauschsignal generiert wurde. Mit dem Verstärker wurde das Signal des Aktors aufgestockt und am Kanal CH A am Oszilloskop M621 dargestellt. Das Grundsignal des Generators wurde über den Kanal B am Oszilloskop dargestellt.

3.2.3 Versuchsdurchführung

Mit dem PSU wurde der Aktor mit einer Grundspannung von 70 V versorgt. Diese Spannung am Aktor wurde mehrmals mit einem Multimeter überprüft. Über den Generator wurden unterschiedliche Rauschsignale generiert, deren Spektren in Abhängigkeit der Nyquist-Frequenz erstellt wurden. Am Oszilloskop wurden die Verstärkungen der einzelnen Kanäle angegeben. Des Weiteren wurde bei den Kanälen der AC-Filter des Oszilloskops aktiviert. Am Oszilloskop wurde die Fast-Fourier-Transformation aktiviert und am dazugehörigen F-Graph Diagramm dargestellt. Die Messdaten wurden mit einer Zeitbasis von 10 ms und über 50 Frames aufgenommen. Die gesamte Messung wurde nochmals mit einer Zusatzmasse von $m=2,15$ kg, welche am Aktorarm angebracht wurde, durchgeführt. Die Masse wurde höher gewählt als beim elektrodynamischen Lautsprecher, da der Aktor höhere Massen verschieben kann als der Lautsprecher und dadurch wurde auch eine größere am Aktor angebracht. Neben dem Amplitudenverlauf wurde auch der Phasenverlauf des Piezoaktors vermessen. Durch den gemessenen Phasenverlauf kann mittels Maximum die Resonanzfrequenz bestimmt werden.

3.3 Optische Messung am Piezoaktor

3.3.1 Geräte

Tabelle 3: Verwendete Geräte und Bauteile für die optische Messung

Gerät	Bezeichnung	Details	Firma
Piezoaktor	PAHL 180/20	Hochlast-Stapeltranslatoren mit mechanischer Vorspannung	Piezosysteme Jena
Hochspannungs-Leistungsverstärker mit programmierbarem digitalem Wellenform-Generator	HV-PA150-2D	Signalgenerator und Leistungsverstärker	CGC Instruments
Oszilloskop	ETC M621	150 MHz 2-Kanal Digital-Speicher-Oszilloskop	ETC s.r.o.
Laserdiode	D650-5I	Wellenlänge=650 nm Leistung=5 mW	US-Laser Inc.
Positionsdetektor	2L10-Su7	Zweidimensional Si-PSD Keramiksubstrat 10x10 mm ²	LASER COMPONENTS GmbH
Decoder- und Steuereinheit für Laserdiode und Positionsdetektor	PSD-DCD-50k	Decoder- und Sensoreinheit für Positionsdetektor	CGC Instruments
Haushaltsspiegel	-	d=58 mm	unbekannt

Neben den verwendeten Geräten wurde die gleiche Software aus Punkt 3.1.1 wiederverwendet.

3.3.2 Versuchsaufbau

3.3.2.1 Untersuchung der Abhängigkeit der 2. und 3. Oberwelle auf unterschiedliche Amplituden

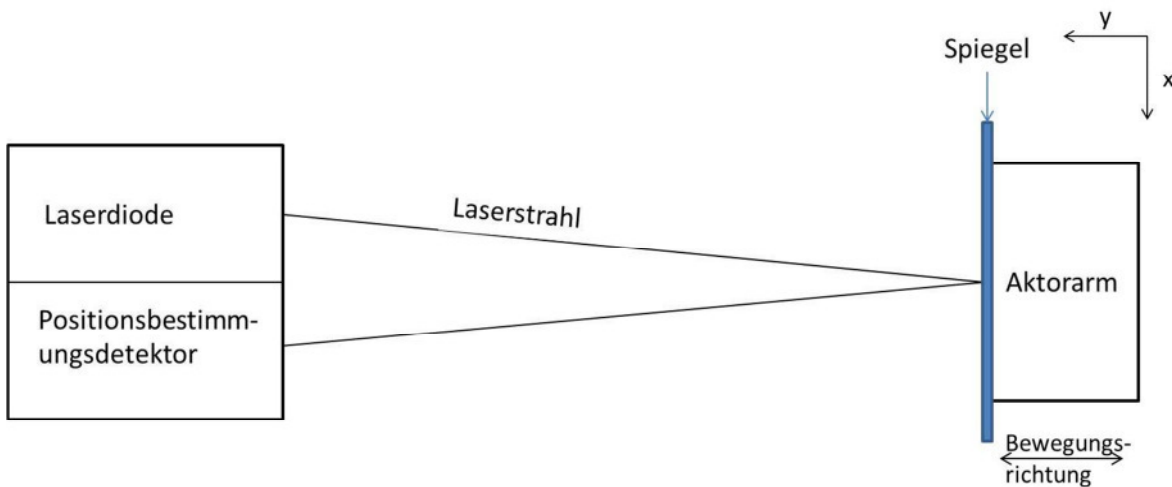


Abbildung 10: Schematischer Aufbau des optischen Messversuchs

Für die Beobachtung der Bewegung des Aktors wird eine optische Messeinrichtung verwendet, welche aus einer Laserdiode (LD) und einem Positionsdetektor (PSD) besteht. Die Entfernung zwischen dem Aktor und der optischen Messeinrichtung betrug 245 cm, da die Ausmaße der PSD optimal genutzt werden können. Der Aktor wird durch einen Signalgenerator mit einem integrierten Verstärker angesteuert. Mit diesem Generator werden Sinussignale mit unterschiedlicher Amplitude und Frequenz generiert. Die Laserdiode und der Positionsdetektor werden mit einer Decoder- und Steuereinheit angesteuert und ausgelesen. Dabei kann bei der Laserdiode die Intensität, Einschaltdauer und Phasenverschiebung eingestellt werden. Der Decoder verarbeitet die Signale in X- und Y-Richtung des Positionsdetektors und bildet noch einen arithmetischen Mittelwert von den gemessenen elektrischen Spannungen. Die Werte für X- und Y-Richtung können aus verschiedenen auswählbaren Formeln errechnet werden, dabei handelt es sich um Vergleichsrechnungen, bei dem die Spannungsänderung zwischen zwei Punkten verglichen wird. Die verwendeten Formeln sind:

$$X = \frac{X_1 - X_2}{2S} \quad (2)$$

$$Y = \frac{Y_1 - Y_2}{2S}$$

$$S = \frac{X_1 + X_2 + Y_1 + Y_2}{4}$$

3.3.2.2 Optische Impedanzmessung am Piezoaktor

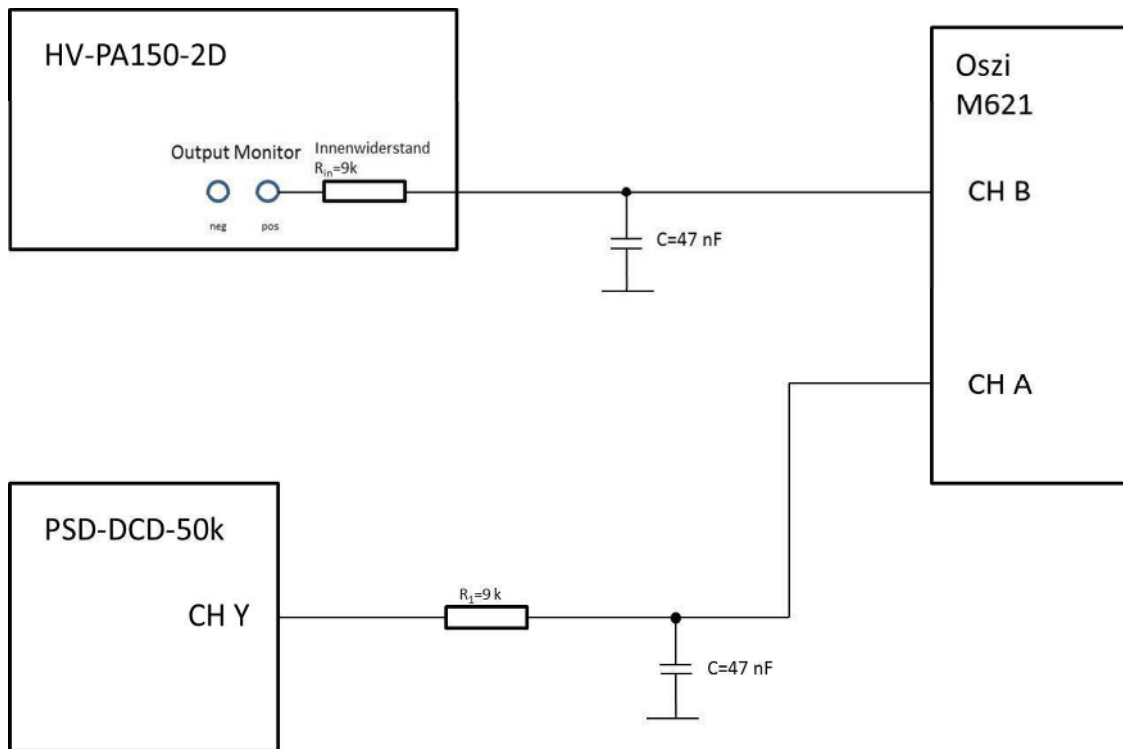


Abbildung 11: Versuchsaufbau für eine optische Impedanzmessung am Aktor

Der HV-PA150-2D ist der Generator der parallel zu einem Kondensator mit 47 nF geschaltet wird, damit ein RC-Filter entsteht. An der PSD wird der CH Y verwendet und ein RC-Filter mit $R=9\text{ k}$ und $C=47\text{ nF}$ zwischen CH A und CH Y.

Die Abbildung 11 zeigt den schematischen Versuchsaufbau der Resonanzmessung des Aktors. Bei dem Generator HV-PA150-2D wurde der positive Monitorausgang genutzt, um das Signal über das Oszilloskop darstellen zu lassen. Da der Ausgang am Generator einen Innenwiderstand von $R=9\text{ k}\Omega$ besitzt, wurde ein Kondensator mit $C=47\text{ nF}$ parallel zum Eingang am Oszilloskop geschaltet. Bei der PSD-DCD-50k wurde der CH Y als Ausgang verwendet und mit einem RC-Filter mit den gleichen Größen wie beim Generator seriell eingebaut. Die RC-Filter sind notwendig um die Frequenz zu begrenzen.

3.3.3 Versuchsdurchführung

3.3.3.1 Untersuchung der Abhängigkeit der 2. und 3. Oberschwingung auf unterschiedliche Amplituden

Für die Charakterisierung des Aktors wurden unterschiedliche Amplituden bei gleich bleibender Frequenz und gleichem Abstand zwischen Aktor und optischer Messeinrichtung ausgewählt. Dabei wurde der Laser fokussiert und über den Spiegel am Aktorarm auf der PSD zentriert. Am Oszilloskop wurden der Kanal A mit der X-Auslenkung und der Kanal B mit der Y-Auslenkung belegt. Über den Computer wurde das Oszilloskop mittels der Be-

dieneroberfläche LabView gestartet. Beide Kanäle wurden für die Darstellung und Mittelung der Signale ausgewählt. Die Abtastrate betrug 1 kHz mit einer Aufnahmezeit von 32,3 s. Die einzelnen Messdaten wurden ca. 20mal wiederholt und gemittelt. Am Generator wurde ein Sinussignal mit einer Frequenz von 5 Hz generiert. Die Amplitude wurde auf unterschiedliche prozentuale Anteile eingestellt. Der Laser wurde auf 5 % seiner maximalen Intensität und Einschaltdauer eingestellt. In der Decodereinheit wurde für das Signal der PSD die Formel (2) verwendet, da diese ein optimales Signal-Rausch-Verhältnis ausgibt. Die Messdaten wurden über ein FFT-Diagramm dargestellt und die Messpunkte wurden in einer Tabelle abgespeichert.

3.3.3.2 Optische Impedanzmessung am Piezoaktor

Für die erste Impedanzmessung wurde die Y-Auslenkung des optischen Messsystems auf den Kanal A des Oszilloskops gelegt und mit einem RC-Filter begrenzt. Das Signal des Generators wurde auf den B Kanal geschaltet und parallel mit einem Kondensator geschaltet, da der Ausgang des Generators einen Innenwiderstand besitzt und sich somit auch ein RC-Filter ergibt. Im Generator wurde ein Rauschsignal generiert, welches an den Piezoaktor angelegt wurde. Das Signal des Generators wurde mit dem des Aktors verglichen. Die restlichen Einstellungen wurden aus Punkt 3.3.3.1 übernommen. Dieser Messversuch wurde anschließend mit einer angebrachten Zusatzmasse von 2,15 kg am Aktorarm wiederholt. Die Masse wurde höher gewählt als beim elektrodynamischen Lautsprecher, da der Aktor höhere Massen verschieben kann als der Lautsprecher und dadurch wurde auch eine größere am Aktor angebracht.

4 Ergebnisse

4.1 Impedanzmessung am elektrodynamischen Lautsprecher

Die erste Messung der Impedanz des Lautsprechers erfolgte ohne Zusatzmasse.

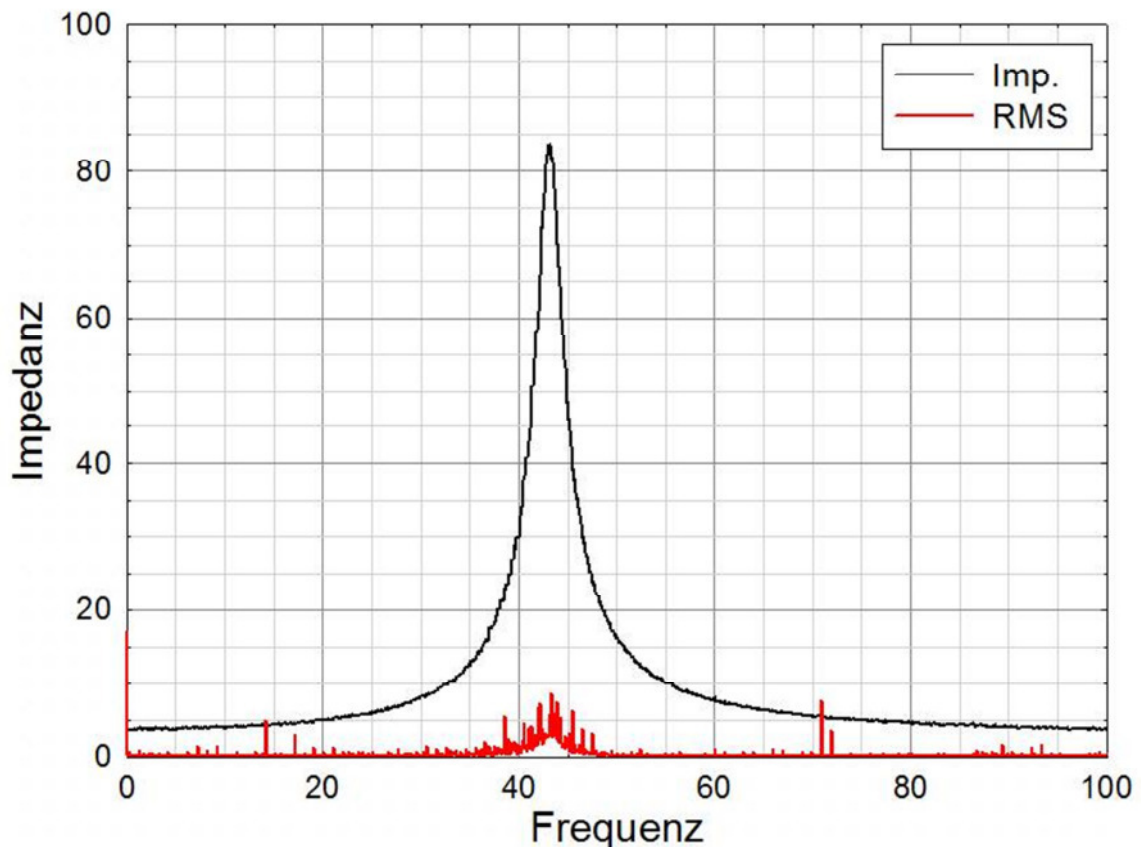


Abbildung 12: Impedanzverlauf des Lautsprechers ohne Zusatzmasse

Die schwarze Kennlinie zeigt die gemessene Impedanz. Die rote Kennlinie zeigt den quadratischen Mittelwert der Abweichungen der Messdaten.

Die Messdaten zeigen eine Impedanzkurve an, welche eine Resonanz bei ca. 44 Hz hat. Durch eine Ausgleichsrechnung (Fit) wurde die Kurve an die gemessenen Daten angepasst. Das Fit erfolgt mit dem Programm SigmaPlot. Für die Ausführung des Fit wurden die Daten der Frequenz, Amplitude und Messunsicherheit benötigt. Für eine erste Anpassung wurden die Messdaten mit dem eingesetzten Verstärker angepasst. Die Formel für den Verstärker ergibt sich aus dem Aufbau des Verstärkers und über die Laplace-Transformierten der eingesetzten Bauteile. Verwendete Bauteile sind zwei Widerstände und ein Kondensator.

$$\begin{aligned}
 u &= R \cdot I \quad \text{---} \quad \bullet U(p) = R \cdot I(p) \\
 Z(p) &= \frac{U(p)}{I(p)} = R \\
 Z(p) &= R
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 i &= C \cdot \frac{du}{dt} \quad \text{---} \quad \bullet I(p) = C \cdot p \cdot U(p) - C \cdot u_0 \\
 \text{Mit } u(t=0) &= u_0 = 0 \text{ ergibt sich:} \\
 Z(p) &= \frac{U(p)}{I(p)} = \frac{1}{p \cdot C} \\
 Z(p) &= \frac{1}{p \cdot C}
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 u &= L \cdot \frac{di}{dt} \quad \text{---} \quad \bullet U(p) = L \cdot p \cdot I(p) - L \cdot i_0 \\
 \text{Mit } i(t=0) &= i_0 = 0 \text{ ergibt sich:} \\
 Z(p) &= \frac{U(p)}{I(p)} = p \cdot L \\
 Z(p) &= p \cdot L
 \end{aligned} \tag{5}$$

Die Formel 3 für den Ohm'schen Widerstand und den kapazitiven Widerstand zeigen die jeweilige Laplace-Transformierte des Widerstandes. Die Formel für den Widerstand wird mit den Laplace-Transformierten aufgestellt und später in die Fourier-Transformierung umgewandelt. Eingesetzt in die Formel ergibt sich für den Verstärker:

$$a_n(p) = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} = \frac{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + p \cdot C}}{R_1} = \frac{R_1 + R_1 \cdot p \cdot C \cdot R_2 + R_2}{R_1 \cdot (1 + p \cdot C \cdot R_2)}$$

$$a_n(p) = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + p \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot C}{1 + p \cdot R_2 \cdot C}$$

$$a_n(p) = A_0 \cdot \frac{1 + p \cdot \tau_1}{1 + p \cdot \tau_2}$$

$$A_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad \tau_1 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot C \quad \tau_2 = R_2 \cdot C$$

$$a_n(\omega) = A_0 \cdot \frac{1 + i \cdot \omega \cdot \tau_1}{1 + i \cdot \omega \cdot \tau_2}$$

$$(|a_n(\omega)|)^2 = A_0^2 \cdot \left(\left| \frac{1 + i \cdot \omega \cdot \tau_1}{1 + i \cdot \omega \cdot \tau_2} \right| \right)^2 = A_0^2 \cdot \frac{1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau_2^2}$$

$$|a_n(\omega)| = A_0 \cdot \sqrt{\frac{1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau_2^2}} \quad (6)$$

Die Formel für den Verstärker wird dann für die erste Impedanzkurve benötigt. Für die Korrektur der Impedanzkurve müssen die Ausgangsamplituden (Abbildung 12) noch mit der Verstärkung A korrigiert werden.

$$\frac{u_{mess}}{Z} = \frac{u_{gen} - u_{mess}}{R_0}$$

$$u_{mess} = (u_{gen} - u_{mess}) \frac{Z}{R_0}$$

$$\left(\frac{Z}{R_0} + 1 \right) \cdot u_{mess} = u_{gen} \frac{Z}{R_0}$$

$$Z \ll R \Rightarrow u_{mess} = u_{gen} \frac{Z}{R_0} \Rightarrow Z = R_0 \cdot \frac{u_{mess}}{u_{gen}} \quad (7)$$

Die Formel zeigt die Berechnung für die Impedanz Z zum Vorwiderstand R_0 mit dem Verhältnis der gemessenen Amplitude (u_{mess}) und der Verstärkung $a(u_{gen})$. Die aus Formel (7) errechnete Kurve zeigte schon eine erste angepasste Impedanzkurve für den Lautsprecher. Für die Ausgleichsrechnung (Fit) wurde die Formel aus allen Bestandteilen (Abbildung 3) eines Lautsprechers erstellt. Dabei wurde die induktive Spule L_e nicht mit betrachtet, da diese erst bei höherer Frequenz ihre Eigenschaften miteinbringt. Die Berechnung erfolgte nach dem Ersatzschaltbild. Als Formel wurde dies wieder in der Laplace-Transformierten angewendet und in die Fourier-Transformierte umgewandelt (Formel (6)).

$$Z(p)_{fit} = R_e + \frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{p \cdot L_m} + p \cdot C_m} \quad (8)$$

Aus der Ausgangsformel geht die Schaltung der einzelnen Bauteile hervor. Für Formel (8) wurde eine Lösung auf ein harmonisches Eingangssignal gesucht. Das Ergebnis wird als Betrag angegeben, da dabei die imaginären Anteile herausfallen.

$$Z(\omega)_{fit} = R_e \cdot \sqrt{\frac{\frac{R_m \cdot (R_m + 2)}{R_e}}{1 + R_m^2 \cdot \frac{C_m}{L_m} \left(\omega^2 \cdot L_m \cdot C_m + \frac{1}{(\omega^2 \cdot L_m \cdot C_m)} \right) - 2}} + 1 \quad (9)$$

Die in Formel (9) gezeigte endgültige Ausgleichfunktion für die Berechnung der Impedanz des Lautsprechers wurde für die Anwendung in SigmaPlot überführt. Für die erste Ausführung zur Bestimmung der Impedanz Z wurden willkürliche Werte für R_e , R_m , C_m und L_m angegeben. SigmaPlot errechnet daraufhin eine Kurve, welche sich an die Ausgangskurve anpasst und bestimmt noch zusätzlich die Werte für R_e , R_m , C_m und L_m . Dieser Ablauf muss dann noch ein bis zwei Mal wiederholt werden, da SigmaPlot die Fit-Kurve immer besser an die Ausgangskurve aus den Messdaten anpasst.

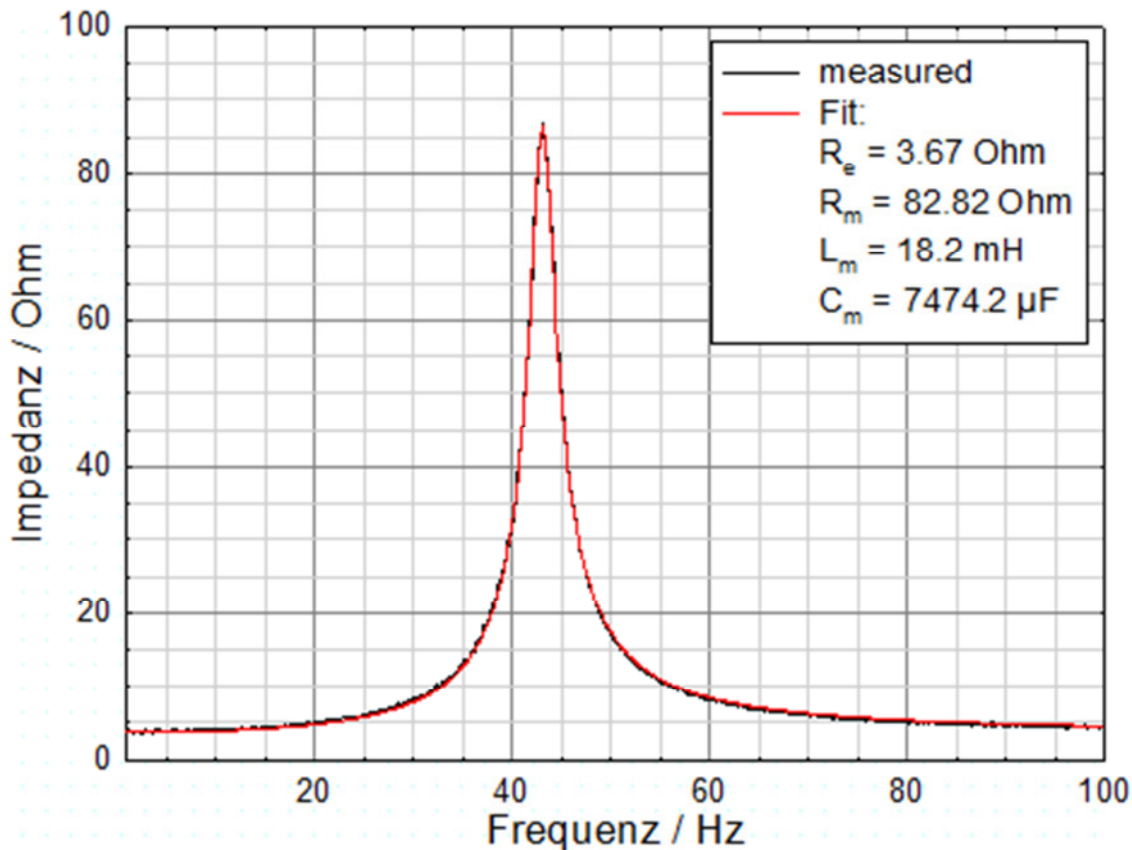


Abbildung 13: Gemessene Impedanzkurve mit Ausgleichskurve für die Messung ohne Zusatzmasse

Abbildung 13 zeigt die Ausgleichskurve (rot), welche den idealen Impedanzverlauf des Lautsprechers entspricht mit dem angegebenen Werten für die Bauteile aus dem Ersatzschaltbild in Abbildung 3. Die angegebenen Werte für das Ersatzschaltbild beschreiben den Zustand im Resonanzfall des Lautsprechers für die einzelnen Elemente.

Die zweite Messung der Impedanz erfolgte mit einer Zusatzmasse von $m=14,7\text{ g}$.

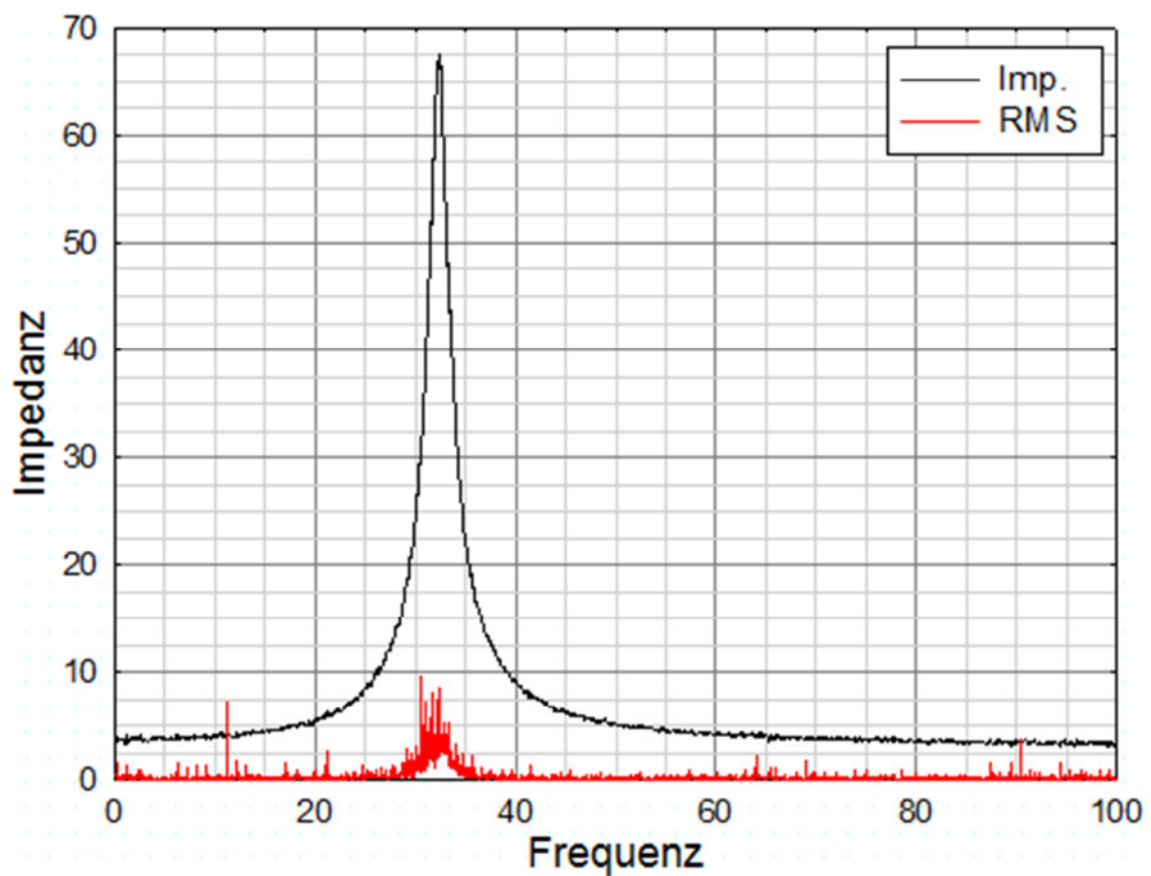


Abbildung 14: Impedanzverlauf des Lautsprechers mit Zusatzmasse

Die schwarze Kennlinie zeigt die gemessene Impedanz. Die rote Kennlinie zeigt wiederum den quadratischen Mittelwert der Abweichungen der Messdaten.

Das Diagramm in Abbildung 14 stellt die Verschiebung der Impedanz und der Resonanzfrequenz des Lautsprechers nach unten dar. Die weitere Abfolge der Berechnung der Impedanz und der Ausgleichskurve ist wie in der Messung ohne Zusatzmasse beschrieben. Folgend werden die Abbildungen der Diagramme und daraus resultierenden Ergebnisse vorgestellt.

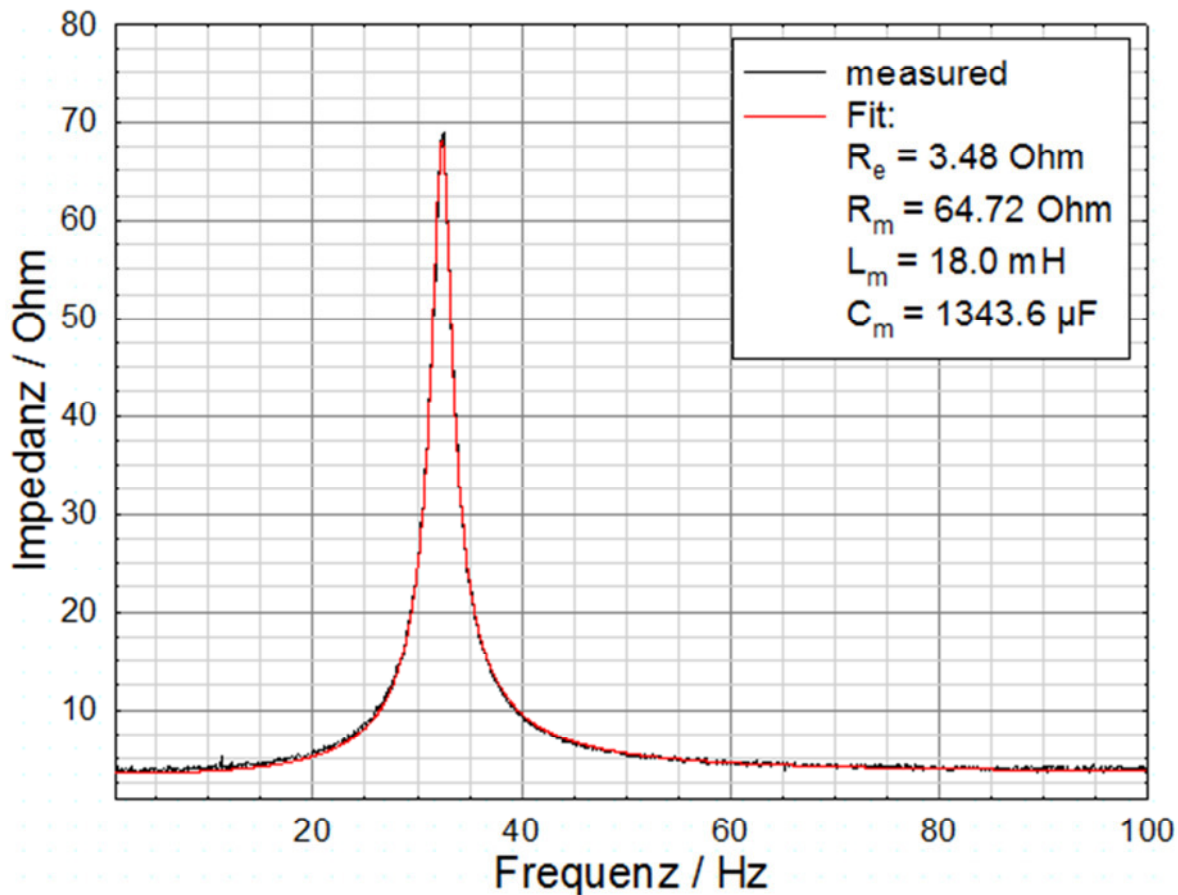


Abbildung 15: Original gemessene Impedanzkurve mit Ausgleichskurve für die Messung mit Zusatzmasse

Abbildung 15 zeigt die gemessene Impedanzkurve und ihre Werte. Zu sehen ist auch, dass sich Resonanz und die Impedanz nach unten verschoben haben, wie schon in Abbildung 14 zu erkennen war.

4.1.1 Berechnung der einzelnen Elemente

In diesem Kapitel werden alle Werte, die für die Charakterisierung des Lautsprechers nötig sind, berechnet. Die nachfolgenden Formeln zeigen die Berechnung der einzelnen Elemente nach dem Ersatzschaltbild für den Lautsprechertest ohne Zusatzmasse. Als Voraussetzung für die Berechnung gelten die Werte für R_e , R_m , L_m und C_m als gegeben aus den Ausgleichskurven vom Punkt 4.1.

Formel 1: Berechnung der TSP

$$Q_{ts} = \frac{R_e \cdot R_m}{R_e + R_m} \cdot \sqrt{\frac{C_m}{L_m}} \quad Q_{ms} = R_m \cdot \sqrt{\frac{C_m}{L_m}} \quad Q_{es} = R_e \cdot \sqrt{\frac{C_m}{L_m}}$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{C_m \cdot L_m}} \quad F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_m \cdot L_m}}$$

$$Z_{max} = R_e + R_m$$

$$m_a = 0,0147 \text{ kg} \quad C_{ma} = 0,0013459879 \text{ F} = C_{m \text{ mit Zusatzmasse}}$$

$$C_{ma} - C_m = \frac{m_a + M_{ms}}{(B + l)^2} - \frac{M_{ms}}{(B + l)^2}$$

$$B \cdot l = \sqrt{\frac{m_a}{C_{ma} - C_m}}$$

$$C_m = \frac{M_{ms}}{(B + l)^2} \Rightarrow M_{ms} = C_m \cdot (B + l)^2 = \frac{C_m}{C_{ma} - C_m} m_a$$

$$L_m = n \cdot (B + l)^2 \Rightarrow n = \frac{L_m}{(B + l)^2}$$

$$R_m = \frac{(B+l)^2}{\varepsilon} \Rightarrow \varepsilon = \frac{R_m}{(B+l)^2} \quad (10)$$

Für die Berechnung der Werte für den Versuch mit Zusatzmasse wird das Kraft B*l aus der Berechnung der Werte ohne Zusatzmasse genommen. Aus diesen Formeln ergeben sich die Ergebnisse in Für die Reibung r und den Widerstand der Bauteile Rs wurde eine Ersatzvariable ε eingesetzt, da diese Werte nicht unterschieden werden konnten. Somit werden die Größen Reibung und Widerstand in der Variable ε zusammengefasst.

Tabelle 4.

Für die Reibung r und den Widerstand der Bauteile R_s wurde eine Ersatzvariable ε eingesetzt, da diese Werte nicht unterschieden werden konnten. Somit werden die Größen Reibung und Widerstand in der Variable ε zusammengefasst.

Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnung aus Formel 1

TSP	ohne Zusatzmasse	mit Zusatzmasse
elektrische Elemente		
R_e in Ω	3,67	3,48
R_m in Ω	82,82	64,72
L_m in H	0,01822	0,01802
C_m in F	0,000747	0,001344
Q_t	0,71	0,90
Q_m	16,77	17,67
Q_e	0,744	0,95
ω_s in Hz	270,96	203,25
F_s in Hz	43,12	32,35
Z_{\max} in Ω	86,50	68,20
mechanische Elemente		
Bl in Tm	4,96	
M_{ms} in kg	0,018	0,033
m_a in g	0	14,7
n in mm/N	0,000739	0,000731
ε in kg/s	0,30	0,38
S_d in m^2	0,025	
d in cm	17,75	

4.2 Impedanzmessung am Piezoaktor

Die erste Resonanzmessung des Aktors erfolgte ohne Zusatzmasse am Aktorarm. Dabei wurden zwei Resonanzfrequenzen festgestellt. Abbildung 16 zeigt die erste Impedanzmessung des Piezoaktors ohne Zusatzmasse. Das Frequenzspektrum erstreckt sich von 50 bis 100 Hz.

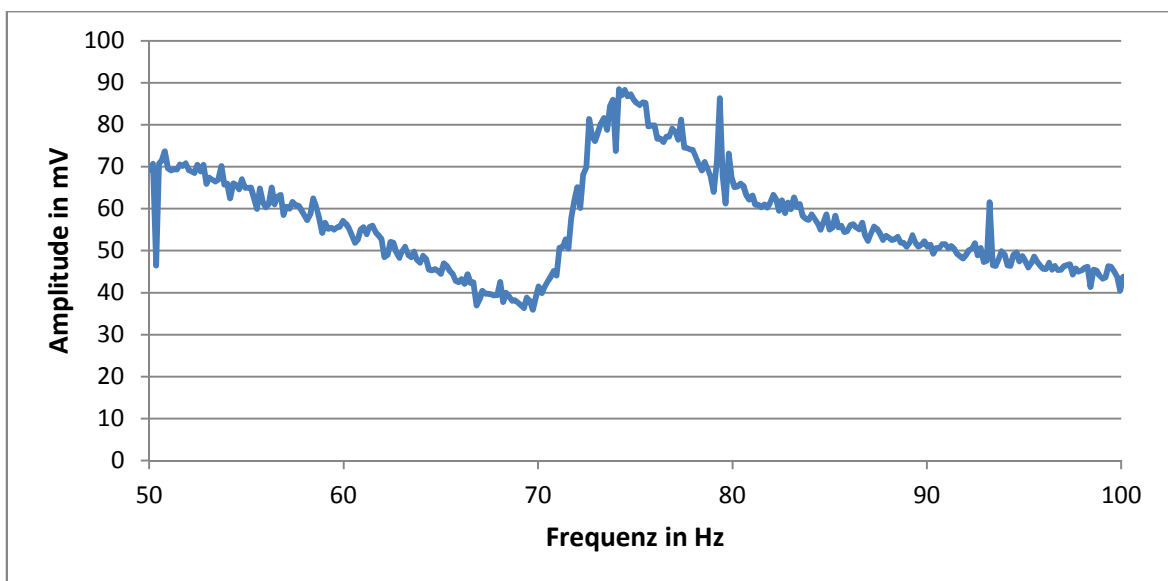


Abbildung 16: Elektrische Amplitude der unteren Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse

Abbildung 17 zeigt die Phasenverschiebung des Piezoaktors. Aus der Abbildung lässt sich die Resonanzfrequenz des Piezoaktors erkennen. Die Resonanzfrequenz der unteren Messung ergibt eine Resonanz bei 72,02 Hz. Die Messung erfolgte mit einer Verstärkung von $A=16$.

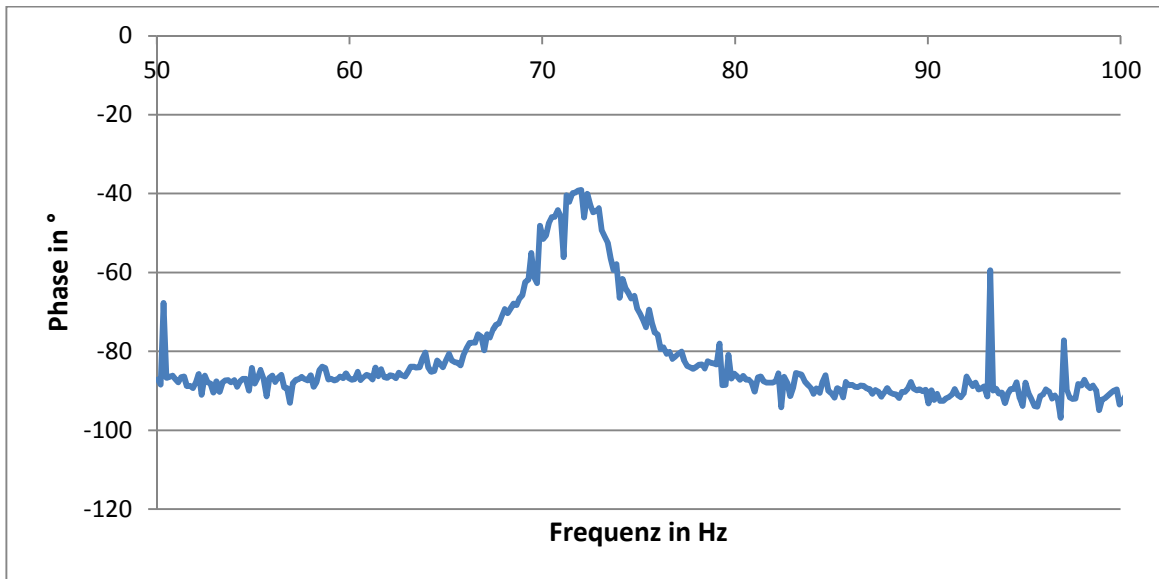


Abbildung 17: Elektrische Phase der unteren Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse

Abbildung 18 zeigt die zweite Impedanzmessung des Piezoaktors ohne Zusatzmasse. Das Frequenzspektrum erstreckt sich von 400 bis 650 Hz.

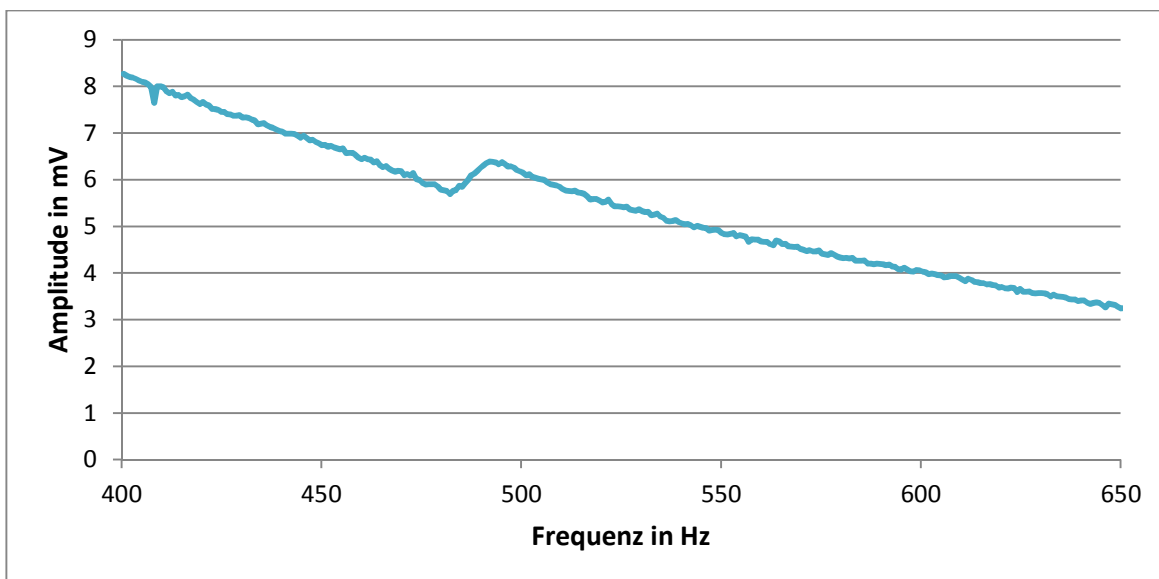


Abbildung 18: Elektrische Amplitude der oberen Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse

Abbildung 19 zeigt die Phasenverschiebung des Piezoaktors. Aus der Abbildung lässt sich die Resonanzfrequenz des Piezoaktors erkennen. Die Resonanzfrequenz der oberen Messung ergibt eine Resonanz bei 485,99 Hz. Die Messung erfolgte mit einer Verstärkung von $A=101$.

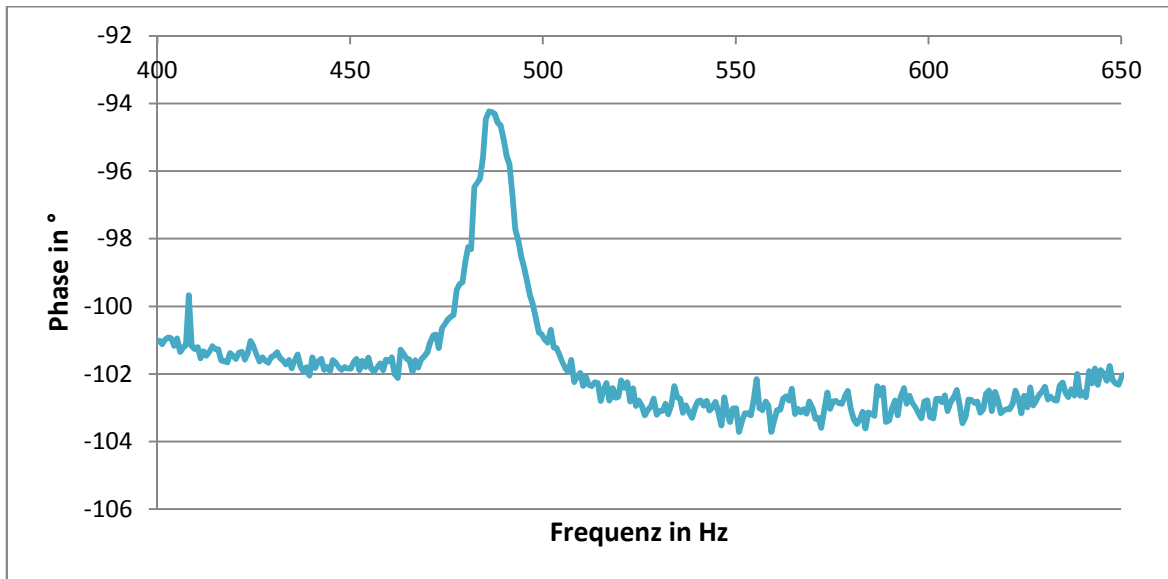


Abbildung 19: Elektrische Phase der oberen Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse

Die zweite Resonanzmessung des Piezoaktors wurde mit einer Zusatzmasse von $m=2,15$ kg durchgeführt. Die Zusatzmasse wurde am Arm des Aktors befestigt. Die Messungen erfolgten wie in den Messversuchen ohne Zusatzmasse. Die erste Impedanzmessung mit Zusatzmasse erfolgt im Frequenzbereich von 30 bis 70 Hz. Abbildung 20 zeigt den Amplitudenverlauf der Messung mit Zusatzmasse.

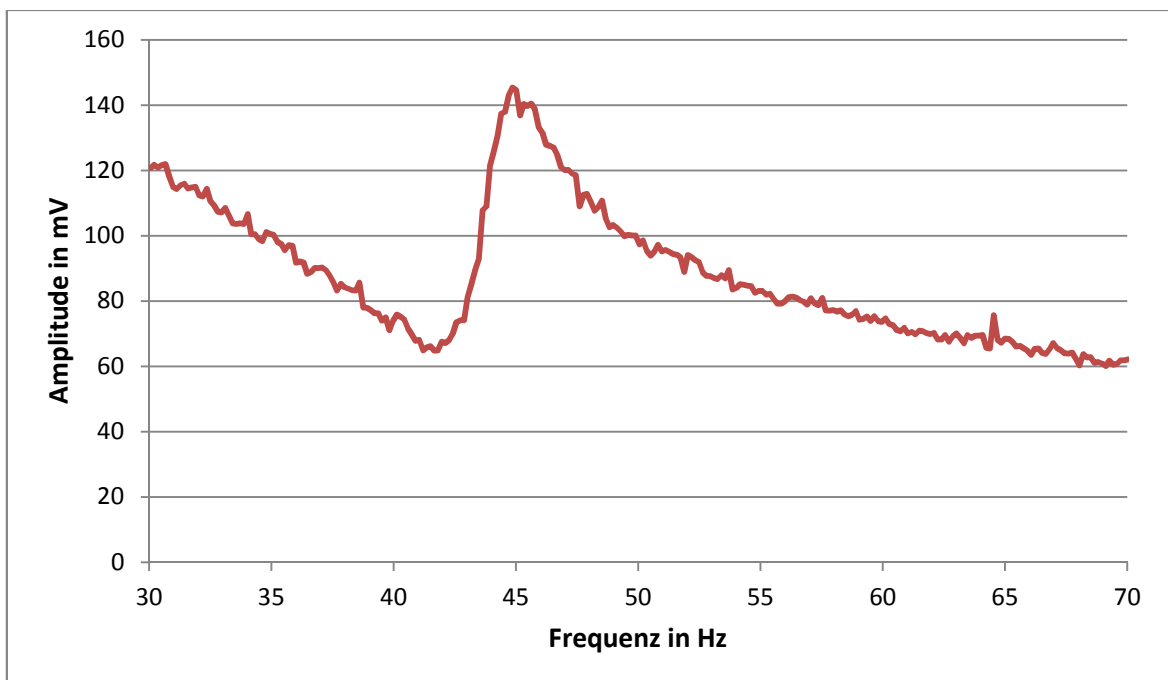


Abbildung 20: Elektrische Amplitude der unteren Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse

Abbildung 21 zeigt die Phasenverschiebung des Piezoaktors. Aus der Abbildung lässt sich die verschobene Resonanzfrequenz des Piezoaktors erkennen. Die Resonanzfrequenz der unteren Messung ergibt eine Resonanz bei 43,34 Hz. Die Messung erfolgte mit einer Verstärkung von $A=101$.

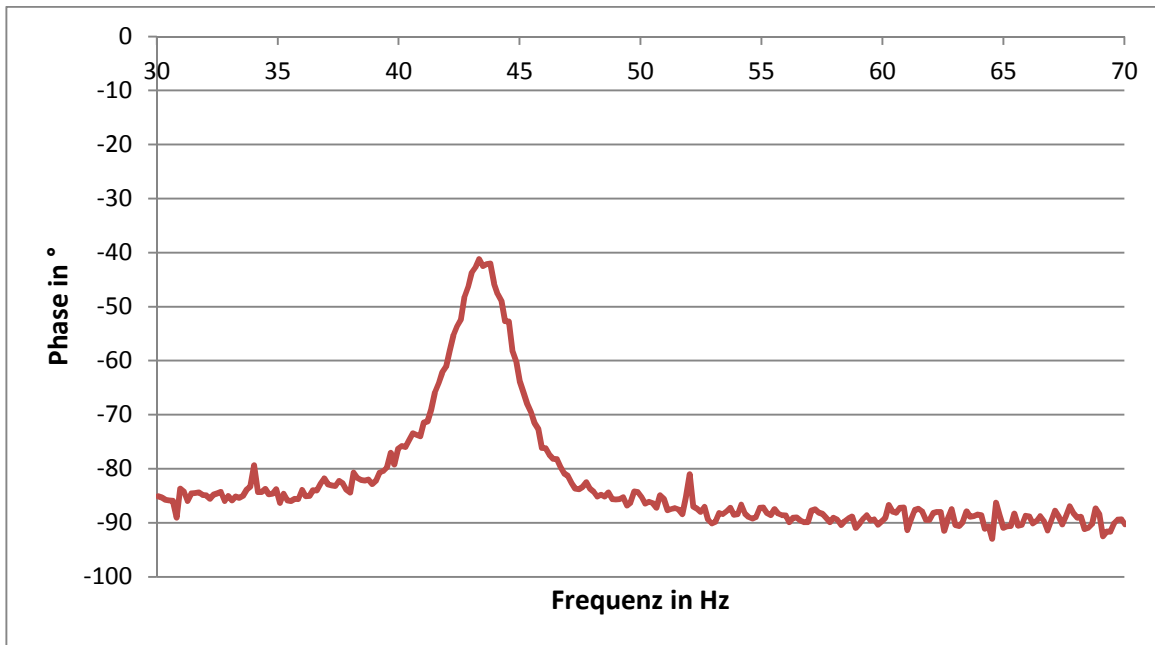


Abbildung 21: Elektrische Phase der unteren Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse

Abbildung 22 zeigt die zweite Resonanzmessung des Piezoaktors mit Zusatzmasse. Das Frequenzspektrum erstreckt sich von 230 bis 370 Hz.

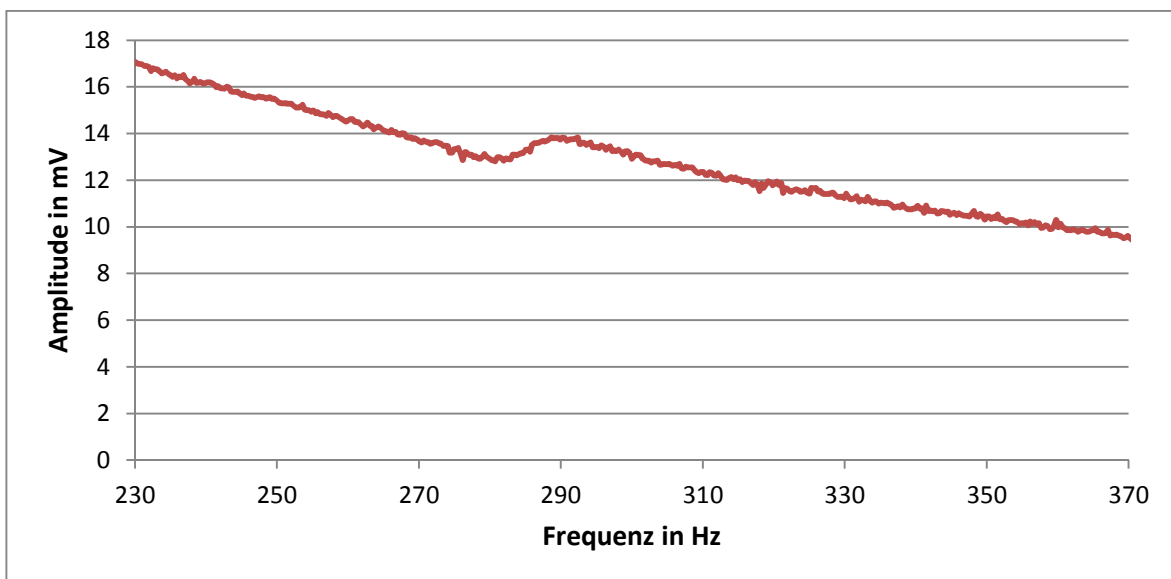


Abbildung 22: Elektrische Amplitude der oberen Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse

Die Abbildung 23 zeigt die Phasenverschiebung des Piezoaktors. Aus der Abbildung lässt sich die verschobene Resonanzfrequenz des Piezoaktors erkennen. Die Resonanzfrequenz der unteren Messung ergibt eine Resonanz bei 285,34 Hz. Die Messung erfolgte mit einer Verstärkung von $A=101$.

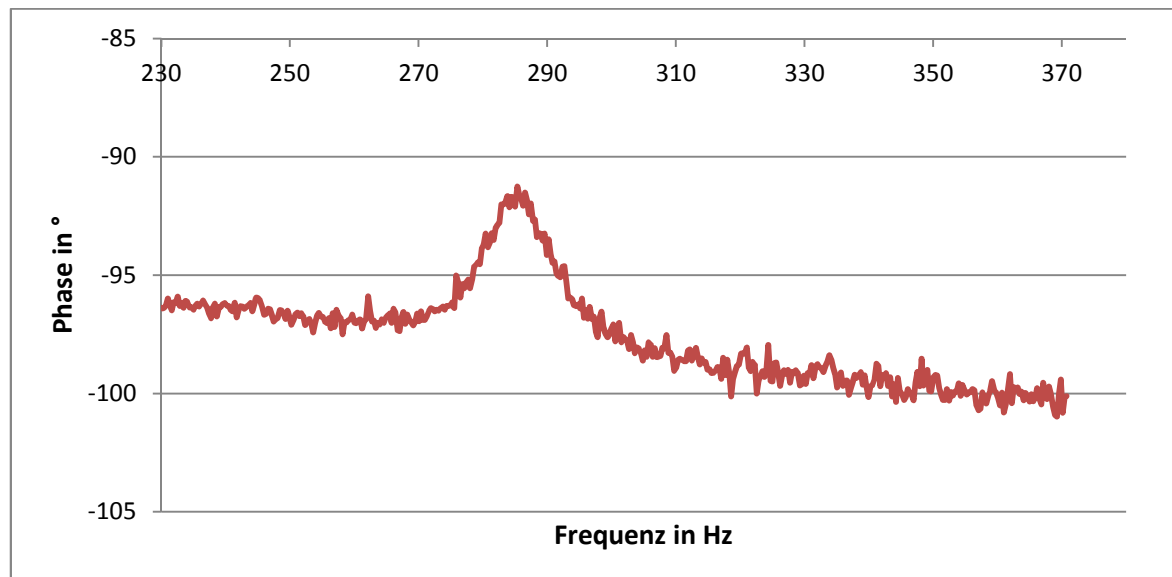


Abbildung 23: Elektrische Phase der oberen Resonanzmessung mit Zusatzmasse

Zusammenfassend sind in Tabelle 5 nochmals alle wichtigen Daten der Messung aufgelistet. Dabei wird der Unterschied zwischen den Messungen ohne und mit Zusatzmasse direkt anschaulich.

Tabelle 5: Elektrische Resonanzmessung

	Resonanzfrequenz in Hz	Amplitude in mV	Phase in °
untere Messung ohne Zusatzmasse	72,0	65,1	-39,1
untere Messung mit Zusatzmasse	43,3	89,6	-41,2
obere Messung ohne Zusatzmasse	486,0	5,9	-94,2
obere Messung mit Zusatzmasse	285,3	13,3	-91,2

4.3 Optische Messung am Piezoaktor

4.3.1 Untersuchung der Abhängigkeit der 2. und 3. Oberschwingung auf unterschiedliche Amplituden

Die Messung des Aktors auf die Untersuchung der Abhängigkeit der zweiten und dritten Oberschwingung auf unterschiedliche Amplituden erfolgte bei gleicher Frequenz und gleichem Abstand zwischen Aktorarm und Messeinheit. Die Messung erfolgte von 5-30 % der vollen Amplitude.

Tabelle 6: Messung der unterschiedlichen Amplituden

	Grundwelle	1. Oberwelle	2. Oberwelle	3. Oberwelle	4. Oberwelle
f in Hz	5,00	10,01	15,01	19,99	24,99
5%	0,36	0,0011	0,0025	0,00084	0,0010
10%	0,80	0,0028	0,0059	0,0011	0,0019
15%	1,30	0,0097	0,012	0,00081	0,0030
20%	1,79	0,015	0,021	0,00091	0,0063
25%	2,36	0,023	0,031	0,0035	0,011
30%	2,94	0,024	0,056	0,0066	0,019

Die Tabelle 6 zeigt die eingestellten Amplituden des Sinussignals bei 5 Hz. Für weitere Messungen am Aktor wird eine Amplitude gesucht, bei der die Verzerrung der ersten und zweiten Oberwelle unter 1 % der Grundwelle liegt. Diese Auswertung der Berechnung der Prozente folgt in Tabelle 7.

$$\text{Prozentualeranteil} = \frac{\text{Oberwelle} \cdot 100}{\text{Grundwelle}} \quad (11)$$

Tabelle 7: Prozentualer Vergleich zur Grundwelle

	1. Oberwelle in %	2. Oberwelle in %	3. Oberwelle in %	4. Oberwelle in %
5%	0,29	0,68	0,23	0,28
10%	0,34	0,74	0,14	0,23
15%	0,74	0,94	0,062	0,23
20%	0,85	1,15	0,051	0,35
25%	0,96	1,29	0,15	0,47
30%	0,82	1,90	0,22	0,66

Wie in Tabelle 7 erkennbar ist, ergeben sich für die Amplitude mit 20, 25 und 30 % eine Verzerrung für die jeweils zweite Oberwelle von über 1 % der Grundwelle.

4.3.2 Optische Impedanzmessung am Piezoaktor

Die erste Resonanzmessung mit der optischen Messeinrichtung erfolgte von 10 bis 200 Hz und 10 % der vollen Amplitude. Abbildung 24 zeigt die Impedanzmessung des Aktors mit der optischen Messeinrichtung. Aus dem Amplitudenverlauf kann die Resonanzfrequenz direkt abgelesen werden. Die Resonanzfrequenz der unteren Frequenzmessung liegt bei 50,35 Hz und einer Amplitude von 27,10 mV.

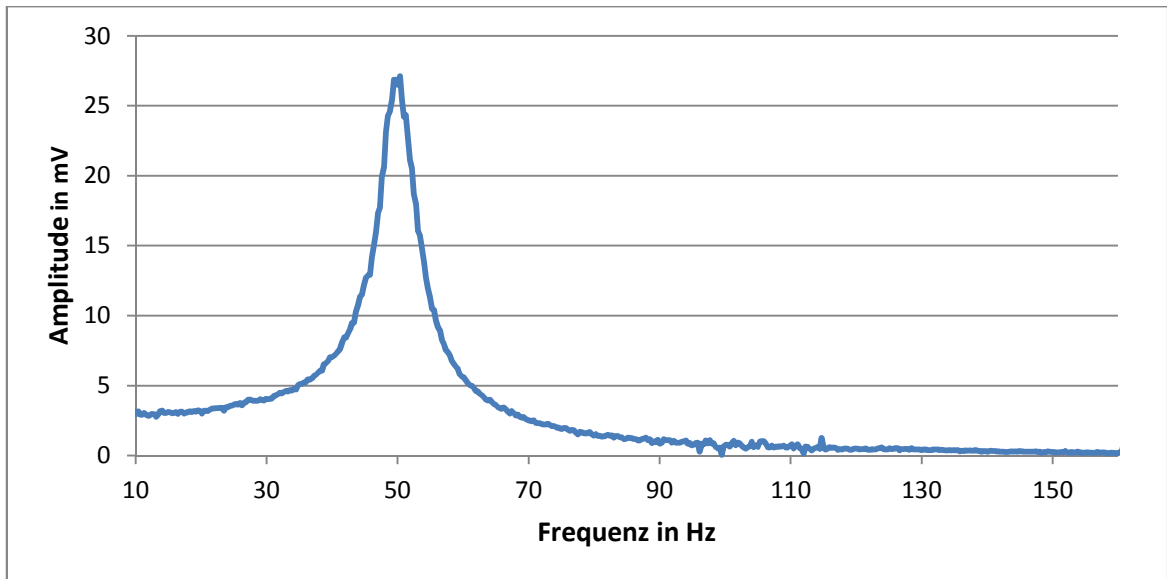


Abbildung 24: Optische Amplitude der unteren Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse

Der Phasenverlauf der optischen Resonanzmessung zeigt einen Verlauf von 180° auf 0° Phasenverschiebung in Abbildung 25.

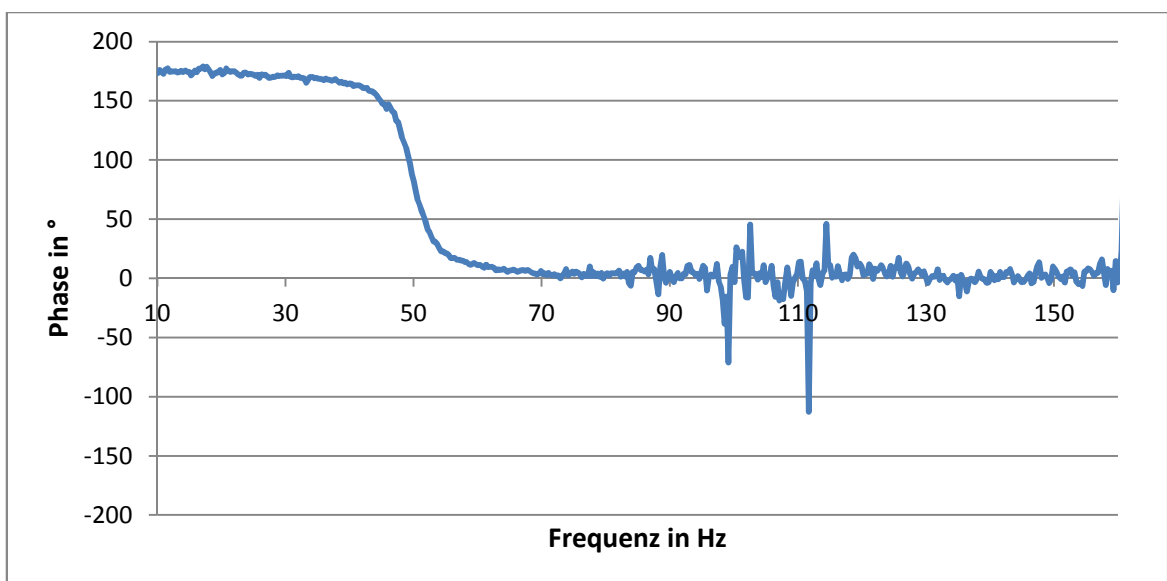


Abbildung 25: Optische Phase der unteren Resonanzmessung ohne Zusatzmasse

Abbildung 26 zeigt sich der Verlauf der Amplitude in Abhängigkeit zur Frequenz. Die Messung erfolgte im Frequenzbereich von 400 bis 500 Hz und einer Amplitude von 10%. Die Resonanzfrequenz im oberen Frequenzspektrum liegt bei 481,87 Hz und einer Amplitude von 13,19 mV. Die Phase verläuft abfallend von 0 bis -180° , wie in Abbildung 27 zu sehen ist.

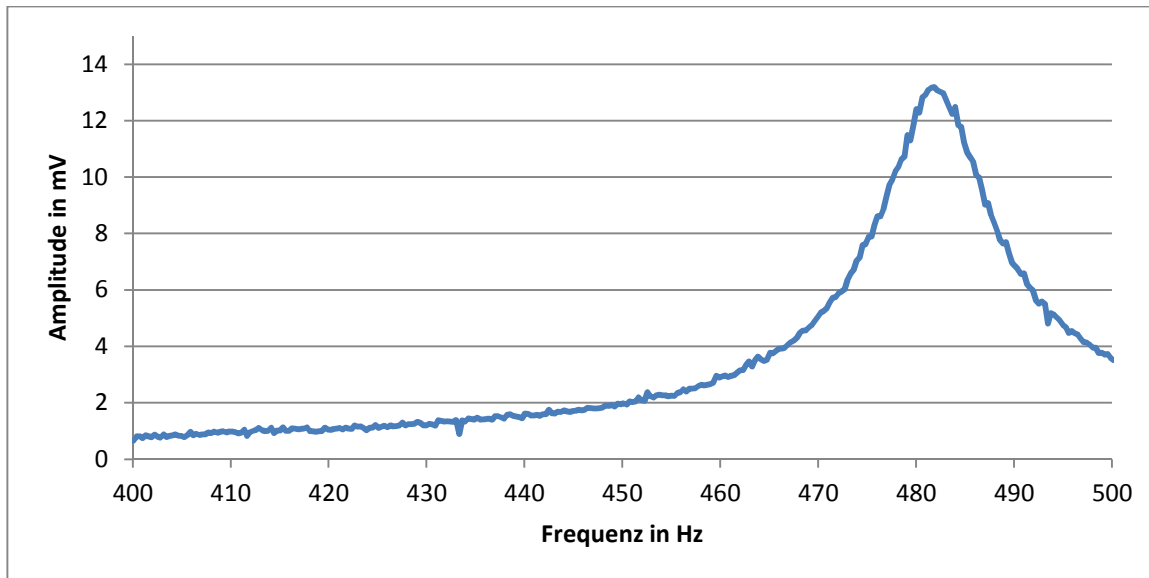


Abbildung 26: Optische Amplitude der oberen Resonanzfrequenzmessung ohne Zusatzmasse

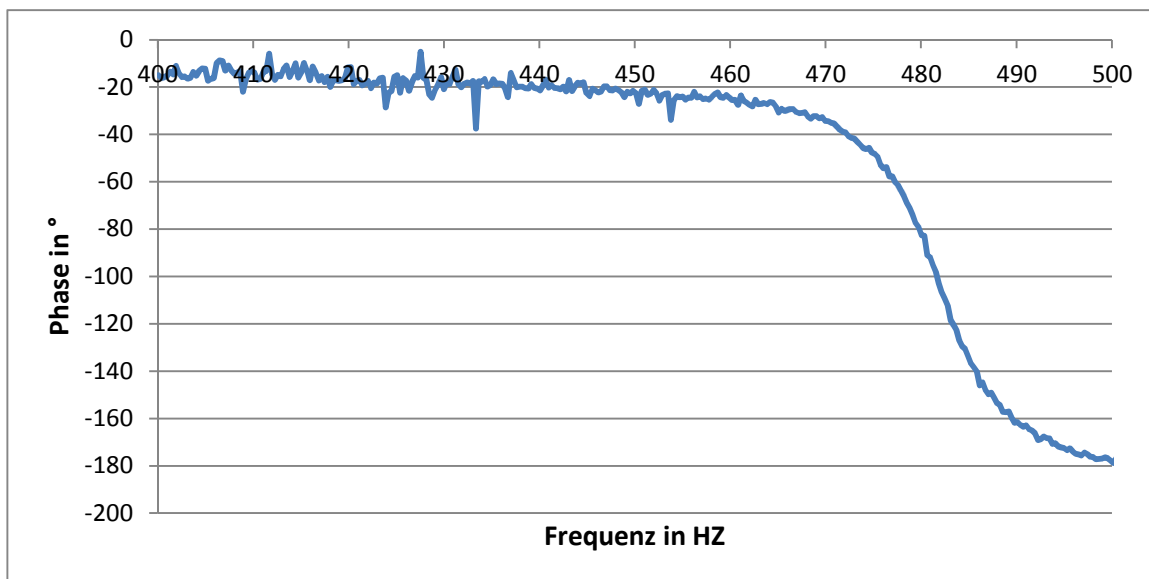


Abbildung 27: Optische Phase der oberen Resonanzmessung ohne Zusatzmasse

Die in Abbildung 28 gemessene Amplitudenkurve in Abhängigkeit zur Frequenz ist im Frequenzspektrum von 0 bis 90 Hz und einer Amplitude am Generator von 10 % aufgenommen. Des Weiteren wurde eine Zusatzmasse von 2,15 kg am Arm des Aktors ange-

bracht. Die Resonanzfrequenz des Aktors mit angebrachter Zusatzmasse liegt bei 21,06 Hz und einer Amplitude von 43,16 mV.

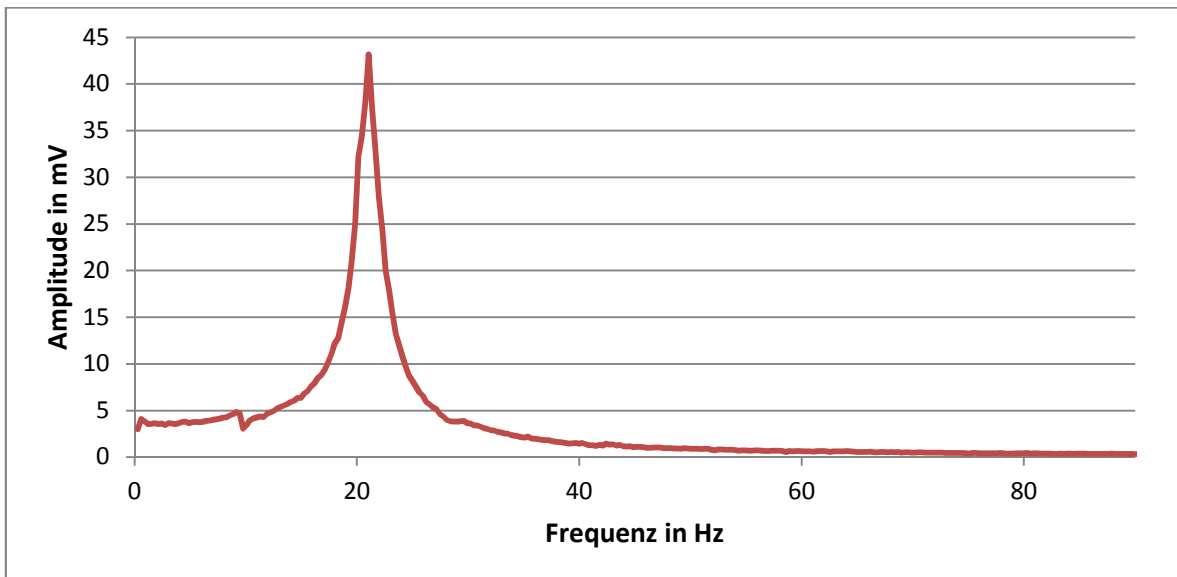


Abbildung 28: Optische Amplitude der unteren Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse

Der Verlauf der Phase des Piezoaktors in Abbildung 29 mit angebrachter Zusatzmasse hat sich nur im Punkt der Resonanzfrequenz geändert. Der Abfall der Phase von 180 auf 0° ist gleich, wie in der Messung ohne Zusatzmasse.

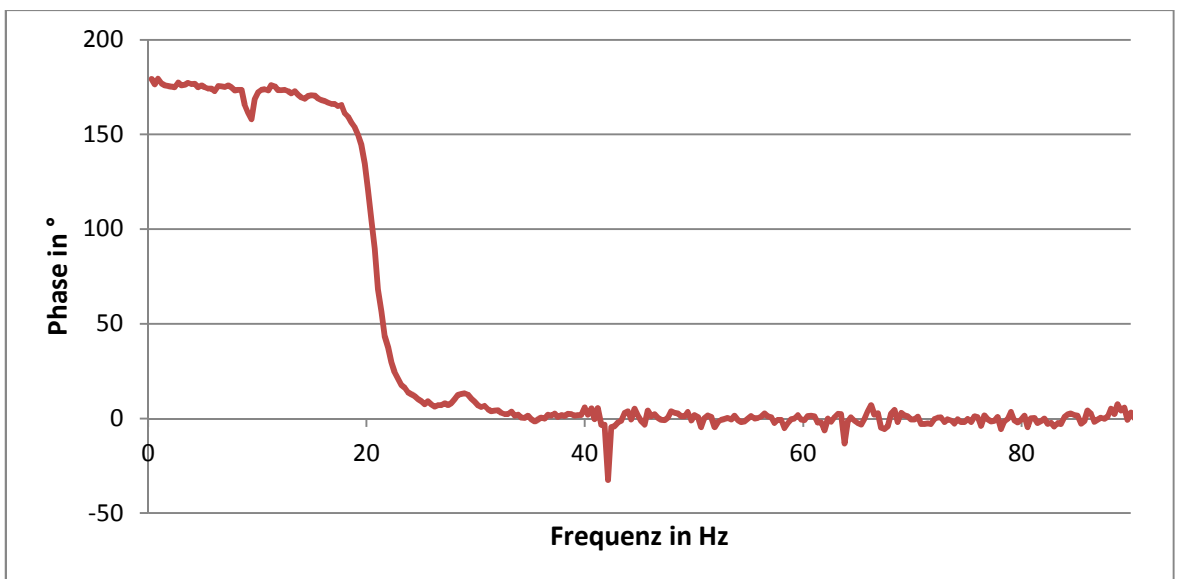


Abbildung 29: Optische Phase der unteren Resonanzmessung mit Zusatzmasse

Die obere optische Resonanzmessung des Piezoaktors ergab keine auswertbaren Daten, da das Signal sehr schwach war. Dadurch ergab sich, wie in Abbildung 30 erkennbar, kein definierter Peak für die Resonanz. Diese unklare Resonanzmessung ist auch in Abbildung 31 erkennbar.

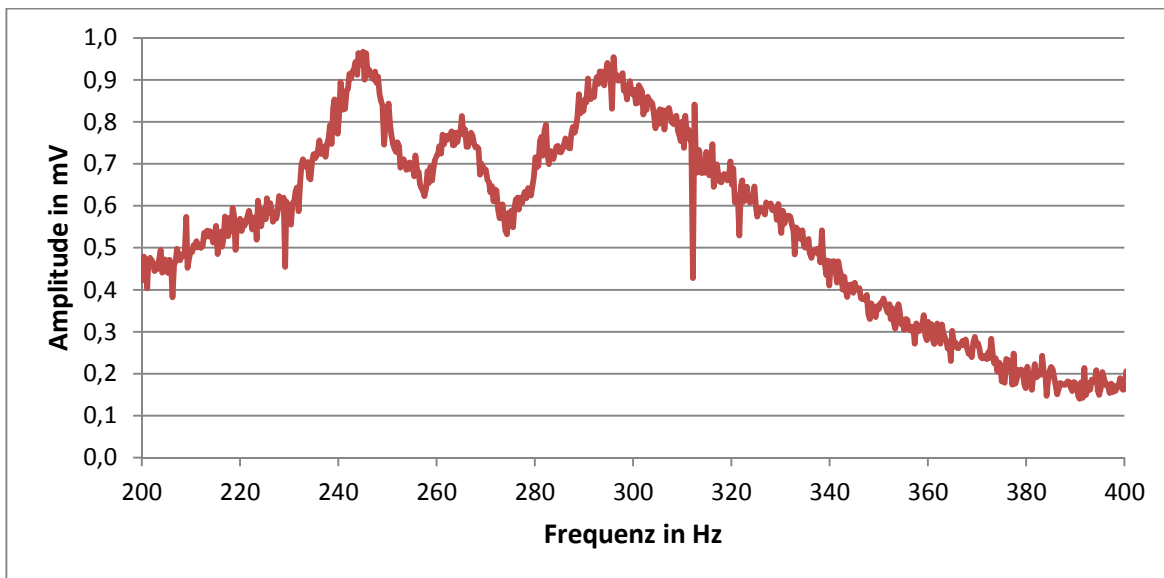


Abbildung 30: optische Amplitude der oberen Resonanzfrequenzmessung mit Zusatzmasse

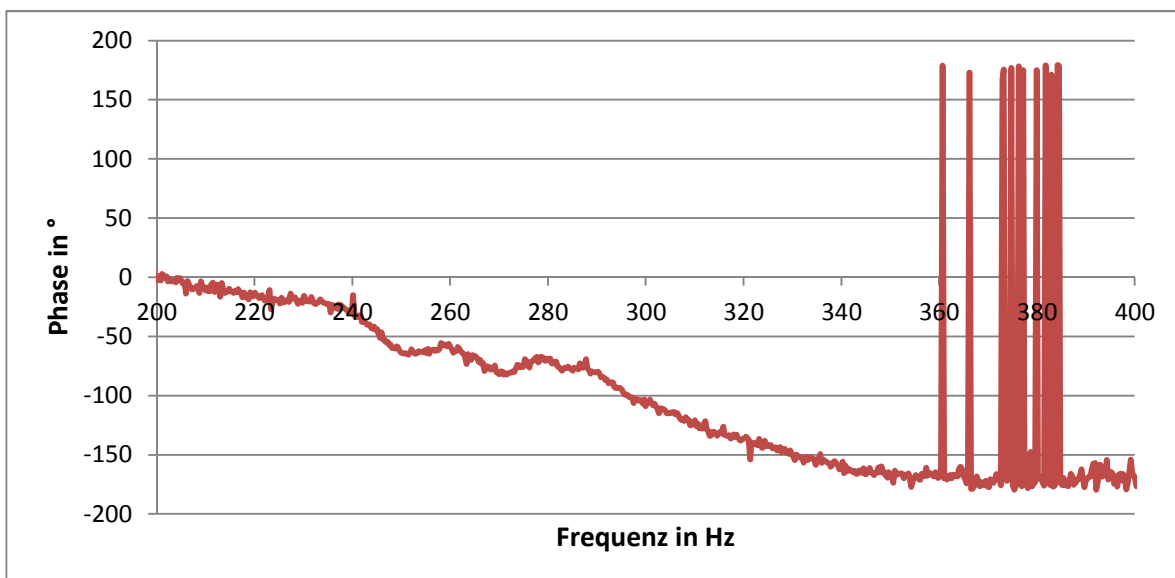


Abbildung 31: optische Phase der oberen Resonanzmessung mit Zusatzmasse

In Tabelle 8 werden die gemessenen Resonanzfrequenzen, Amplituden und Phasen zusammengefasst. Dabei wird der Unterschied zwischen den Messungen ohne und mit Zusatzmasse direkt veranschaulicht.

Tabelle 8: Die gemessenen Größen der optischen Resonanzmessung

	Resonanzfrequenz in Hz	Amplitude in mV	Phase in °
untere Messung ohne Zusatzmasse	50,4	27,1	82,0
untere Messung mit Zusatzmasse	21,1	43,2	89,8
obere Messung ohne Zusatzmasse	481,9	13,2	-103,0
obere Messung mit Zusatzmasse	keine auswertbaren Daten		

Die in Tabelle 9 aufgelisteten Resonanzfrequenzen zeigen die Messunterschiede zwischen der elektrischen und optischen Messeinrichtung.

Tabelle 9: Vergleich der gemessenen Resonanzfrequenzen für den Piezoaktor

		Resonanzfrequenz in Hz
untere Messung ohne Zusatzmasse	elektrisch	72,0
	optisch	50,4
untere Messung mit Zusatzmasse	elektrisch	43,3
	optisch	21,1
obere Messung ohne Zusatzmasse	elektrisch	486,0
	optisch	481,9
obere Messung mit Zusatzmasse	elektrisch	285,3
	optisch	keine auswertbaren Daten

5 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse ausgewertet und eventuelle Fehler oder Änderungsvorschläge für spätere Messungen beschrieben.

5.1 Impedanzmessung am elektrodynamischen Lautsprecher

Die Ergebnisse aus Für die Reibung r und den Widerstand der Bauteile R_s wurde eine Ersatzvariable ϵ eingesetzt, da diese Werte nicht unterschieden werden konnten. Somit werden die Größen Reibung und Widerstand in der Variable ϵ zusammengefasst.

Tabelle 4 zeigen die einzelnen elektrischen und mechanischen Bauteile aus dem Ersatzschaltbild des elektrodynamischen Lautsprechers. Bei R_m , C_m und F_s ist die Einbringung der Zusatzmasse direkt zu erkennen. Der Scheinwiderstand R_m verringert sich von $82,82 \Omega$ auf $64,72 \Omega$ und die Resonanzfrequenz F_s sinkt von $43,12 \text{ Hz}$ auf $32,35 \text{ Hz}$. Die Kapazität des Kondensators C_m aus dem Ersatzschaltbild verdoppelt sich durch das Anbringen der Zusatzmasse an die Membran. Dadurch ergibt sich, dass die Masse der schwingenden Bauteile des Lautsprechers direkt im Ersatzkondensator widergespiegelt wird. Für die Ersatzspule ist keine Einwirkung durch die Zusatzmasse zu erkennen. Es gibt zwar einen Unterschied von $18,22 \text{ mH}$ auf $18,02 \text{ mH}$. Dieser kann aber durch Mess- oder Rundungsfehler auftreten. Beim Widerstand R_e ist eine Änderung von $3,67 \Omega$ auf $3,47 \Omega$ zu erkennen. Dies kann auf die Toleranz des Hersteller zurückgeführt werden, da bei einem 4Ω Lautsprecher der gemessene Wert bis zu 20% unter der Nennimpedanz liegen kann. Somit liegen die Werte für R_e im Toleranzbereich. Des Weiteren kann der Unterschied auf den fließenden Strom zurückzuführen sein, da sich die Toleranz des Herstellers für den Lautsprecher auf Unterschiede in der Herstellung beziehen lässt. Bei der Vergrößerung der zu bewegend Masse wird ein größerer Strom benötigt und dadurch verringert sich der Widerstand R_e , da die angelegte Spannung gleich bleibt. Die Unterschiede bei den Qualitätsdefinitionen für Mechanik, Elektrik und der Gesamtqualität resultieren aus den Unterschieden bei den Werten der einzelnen Ersatzbauelemente, mit denen die Qualitäten berechnet werden. Somit ist bei Q_m der größte Unterschied zu erkennen, weil diese Qualität durch R_m definiert wird, da es bei der Berechnung für die elektrische Qualität nur durch R_e definiert wird. Da bei allen Berechnungen für die Einzelqualitäten und der Gesamtqualität der Faktor $\sqrt{\frac{C_m}{L_m}}$ miteinbezogen wird, kann dieser für die Beur-

teilung der Ergebnisse vernachlässigt werden. Bei der dynamisch bewegten Masse M_{ms} zeigt sich aus der Differenz der beiden Massen. Die angebrachte Zusatzmasse von 14,7 g, die im Versuch verwendet wurde. Die Masse M_{ms} im Versuch ohne Zusatzmasse beschreibt alle beweglichen Elemente im Lautsprecher bei der Wandlung von einem elektrischen Signal in ein akustisches Signal. Da im Versuch mit Zusatzmasse ein Gewicht von 14,7 g angebracht wurde, ergibt sich das Ergebnis aus der Summe von der Zusatzmasse mit dem M_{ms} aus der Rechnung ohne Zusatzmasse. Mit der Spule L_m aus dem Ersatzschaltbild wird die mechanische Nachgiebigkeit n der Aufhängung der Membran im Lautsprecher angegeben. Durch die Zusatzmasse wird diese nicht beeinträchtigt. Die Ergebnisse für n spiegeln diese Behauptung wieder, da sich der Wert nur um 1 % ändert. Für die Reibung der schwingenden Element- und Widerstandbauteile, welche in der Variable ϵ zusammen gefasst wurden, ergibt sich eine Erhöhung der Reibung um 0,08 kg/s, dabei wird wieder auf die Zusatzmasse zurückgeschlossen. Für alle Messwerte kann ein Messfehler angenommen werden, welcher durch Messung und Berechnung entsteht. Für die Berechnung kann ein sehr kleiner Messfehler festgestellt werden, da SigmaPlot die Genauigkeit der berechneten Messergebnisse angibt und diese bei weniger als 0,1–0,01 % lagen. Für die Messung der Werte wird ein größerer Fehler angenommen, da durch Fremdeinwirkungen die Messung verfälscht werden kann. Aus diesem Grund wurden bei beiden Messungen einige Messdaten heraus genommen, da diese mit einem deutlich zu hohen RMS-Wert einen einwirkenden Fehler aufwiesen. Zum Beispiel wurde bei der Messung ohne Zusatzmasse ein RMS-Wert von über 100 festgestellt, wobei sich der RMS-Wert normalerweise bei 1 % der Amplitude aufhält.

5.2 Piezoaktor

5.2.1 Impedanzmessung am Piezoaktor

Die ersten Messungen der elektrisch gemessenen Resonanz des Piezoaktors ergaben zwei Resonanzfrequenzen des Aktors. Die untere Resonanzfrequenz liegt bei 72,0 Hz und die obere bei 486,0 Hz. Durch das Anbringen einer Zusatzmasse am Aktorarm ergab sich eine Verschiebung der Resonanzfrequenz. Die untere Frequenz verschob sich auf 43,3 Hz und die obere Frequenz auf 285,3 Hz. Die Amplitude der Messungen ohne Zusatzmasse ergab für die untere Frequenz einen Wert von 65,1 mV am Punkt der Resonanzfrequenz. Die obere Resonanzmessung ergab 5,9 mV für die Amplitude. Durch die angebrachte Zusatzmasse änderte sich auch die Amplitude der Resonanzfrequenz. Die untere Frequenzmessung ergab eine Amplitude von 89,6 mV und die obere von 13,3 mV. Somit wird durch eine Zusatzmasse die Resonanzfrequenz nach unten verschoben und

die Amplitude nach oben. Die Phase der unteren Frequenzmessung änderte sich von $-39,1^\circ$ auf $-41,2^\circ$ durch das Anbringen der Zusatzmasse. Dieser Wert für die Messung ist annähernd gleich. Dies ergab sich auch für die obere Frequenzmessung des Aktors, denn die Phase änderte sich von $-94,24^\circ$ auf $-91,25^\circ$ durch die angebrachte Masse. Der Phasenverlauf lässt sich durch eine Zusatzmasse nicht verändern.

5.2.2 Optische Messung am Piezoaktor

Die ersten Messungen mit dem Piezoaktor und der optischen Messeinrichtung erfolgten über eine Änderung der Amplitude. Dabei wurden die Grundwellen mit den jeweils dazu gehörigen Oberwellen verglichen. Hier sollte eine Verzerrung der ersten und zweiten Oberwelle unterhalb 1 % der Grundwelle als Resultat herauskommen. Die ersten Amplituden von 5-15 % ergaben dabei nur eine geringe Verzerrung für die erste und zweite Oberwelle. Für die restlichen Amplituden von 20-30 % wiesen die zweiten Oberwellen eine Verzerrung auf, dabei stieg die Verzerrung mit dem Anstieg der Amplitude. Für die Impedanzmessung konnten dann nur die Amplituden verwendet werden, bei der keine Verzerrung nachgewiesen wurde.

Die Resonanzmessung des Piezoaktors mit dem optischen System wurde wieder durch Phasenverlauf und Amplitude verglichen. Die Amplituden der optischen Messungen sind in mV angegeben, da bei einer Auslenkung von 1 mm eine Spannungsänderung von 1 V entsteht. Die Amplituden der unteren Resonanzmessungen ohne und mit Zusatzmasse ergab eine Verschiebung der Resonanzfrequenz von 50,4 Hz auf 21,1 Hz. Die Phase der beiden unteren Frequenzmessungen ergab einen Wert für die ohne Zusatzmasse von $82,0^\circ$ und $89,8^\circ$ für die mit Zusatzmasse. Bei der oberen Frequenzmessung konnte nur für die Messung ohne Zusatzmasse eine auswertbare Kurve aufgenommen werden. Die Resonanzfrequenz liegt bei 481,9 Hz für die obere Frequenzmessung ohne Zusatzmasse. Die aufgenommen Kurve der Messung mit Zusatzmasse im oberen Frequenzbereich lässt keine genaue Bestimmung der Resonanzfrequenz zu. Der Verlauf der Kurve lässt nur einen Bereich erkennen, in dem die Resonanzfrequenz liegen könnte. Dieser Bereich erstreckt sich von 240-300 Hz. Die Kurve der Amplitude lässt in diesem Bereich gleich 3 Peaks erkennen und der Phasenverlauf zeigt einen Abfall der Kurve von ca. 0° auf -110° mit weiteren sinken auf -180° bei 360 Hz. Die Amplituden der gemessenen Kurven zeigen einen Anstieg durch das Anbringen der Zusatzmassen an. Bei der unteren Resonanzfrequenz ergab sich für die Messung ohne Zusatzmasse eine Amplitude von 27,1 mV und durch die Zusatzmasse erhöhte sich die Amplitude auf 43,16 mV. Die obere Resonanzfrequenzmessung ergab einen Wert von 13,19 mV ohne Zusatzmasse und aus dem Kur-

verlauf der Messung mit Zusatzmasse erreichen die 3 Peaks nur einen maximalen Wert von 0,966 mV. Aus diesen Daten lässt sich für die obere Resonanzmessung ein Fehler erkennen, da die Amplitude der Messung mit Zusatzmasse höher sein sollte als die Messung ohne Zusatzmasse.

5.2.3 Zusammenfassung der Messungen am Piezoaktor

Die elektrische Messung des Piezoaktors zeigte einen typischen Verlauf der Messkurve für die Amplitude und für die Phase. Die optische Messung zeigte einen vergleichbaren Kurvenverlauf der Amplitude und Phase, wie bei der Messung des elektrodynamischen Lautsprechers. Die elektrische Messung wies eine Resonanzfrequenz im unteren Bereich von 72,0 Hz und die optische Messung eine bei 50,4 Hz. Diese Verschiebung der Resonanzfrequenz zeigte sich nur im unteren Bereich der Frequenz. Die obere elektrische Frequenzmessung ergab einen Wert von 486,0 Hz und die optische einen Wert von 481,9 Hz. Dadurch ergibt sich für die untere Frequenzmessung eine Verschiebung der Resonanzfrequenz von ca. 30 %. Diese Verschiebung spiegelte sich in der oberen Frequenzmessung nicht wider, denn da sind es nur ca. 0,85 %. Verschiebung, welche sich auf Messfehler, Messeinstellungen und die unterschiedlichen Messmethoden von elektrischer und optischer Messung begründen lassen. Die optische Messung ist noch eine große Fehlerquelle, da diese Messung das erste Mal für diesen Piezoaktor entwickelt und verwendet wurde. Die optische Messeinrichtung ist auf einem Stativ befestigt, welches keine genauen Einstellungen in Höhe, Neigungswinkel und Drehwinkel zulässt. Das Stativ wird weiterhin durch Bewegung des Bodens beeinflusst, welche durch Bewegung im Raum oder vor dem Raum hervorgerufen werden. Die optische Messeinrichtung wird des Weiteren durch äußerliche Lichteinflüsse beeinträchtigt, welche nicht verhindert werden können, wie zum Beispiel das Sonnenlicht, welches schon größtmöglich eingedämmt wurde. Auftretende Messfehler für die elektrische Messung sind Erschütterungen und akustische Signale.

Die Auswertung der Messergebnisse sind nicht vollständig für Piezoaktor erfolgt, da der Aufbau des Aktors und der Messeinrichtungen sehr komplex und neu sind. Die optische Messeinrichtung wurde das erste Mal für den Aktor verwendet und es gab noch keine Erfahrungen in Bezug auf Fehler- und Störquellen oder Messeinstellungen, somit hatten sich die ersten Messungen nur mit der Einstellung der Optik beschäftigt. Mit weiteren Messungen wurden immer mehr Störquellen aufgedeckt und so gut wie möglich behoben. Die komplette Auswertung der Messergebnisse würde noch einige Zeit dauern, aus die-

sem Grund wurden nur die ersten erfolgreichen Messergebnisse vorgestellt und ausgewertet.

Literaturverzeichnis

Brechmann, Dzieia, Hörnemann, Hübscher, Jagla und Petersen (2000): *Elektrotechnik, Tabellen, Kommunikationselektronik*. 3. Auflage, Westermann Schulbuchverlag GmbH

Hausdorf (2005): *Handbuch der Lautsprechertechnik*. 7. Auflage, VISATON GmbH & Co. KG

Hering, Martin, Stohrer (2012): *Physik für Ingenieure*. 11. bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Sack, Bierbach, Wuerfel, Klatt, Hamhaber, Papazoglou, Marus, Braun: The impact of aging and gender on brain viscoelasticity. *Neuroimage* 2009, 46(3): 652-657

URL-1 (6.12.2012) Sack: *Welcome to the Elastography Group of the Charité*
URL: <http://elastography.charite.de/en/>

URL-2 (8.01.2013) Föllner: *Lautsprecher-Selbstbau Theorie & Praxis*
URL: <http://www.selfmadehifi.de/tsp.htm>

URL-3 (22.01.2013) Hügel: *TSP-Grundlagen*
URL: <http://www.carhifi-gehaeuse.de/tspgrundlagen.html>

URL-4 (23.01.2013) Ehman: *MR Elastography Reveals Liver Fibrosis Prior to Cirrhosis*
URL: <http://www.carhifi-gehaeuse.de/tspgrundlagen.html>

URL-5 (8.02.2013) Audio Design GmbH.: *Lautsprecher Aufbau*
URL: <http://www.dbcup.com/ad/index.php?site=lsaufbau>

URL-6 (11.02.2013) ETC s.r.o.: *25 MHz 2-Kanal Digital-Funktionsgenerator ETC M631*
URL: <http://www.etc.sk/index.php/en/products/arbitrary-waveform-generators/item/129-m631-arbitrary-waveform-generator.html>

URL-7 (11.02.2013) CGC Instruments: *150 MHz 2-Kanal Digital-Speicher-Oszilloskop ETC M621*
URL: <http://www.cgc-instruments.com/PC/EML-II/ETC-M621>

URL-8 (17.02.2013) Hudde: *Elektroakustik*
URL: http://medi.uni-oldenburg.de/download/docs/lehre/pichl09/03_Hudde.pdf

URL-9 (9.04.2013) PiezosystemJena: *Serie PAHL*
URL:
http://www.piezosystem.de/piezo_nanopositionierung/piezo_aktoren_nano_positioniersysteme/stapelaktoren/serie_pahl/

URL-10 (9.04.2013) Reichert: *Schwingquarze in der modernen Elektronik*
URL: <http://www.chemiephysikskripte.de/quarz/quarzfr.htm>

URL-11 (9.04.2013) Kessler: *Simulation der Dynamik eines Piezoelements, Frequenzbereich, Zeitbereich, Aufstellen des Ersatzschaltbildes*
URL: <http://www.home.hs-karlsruhe.de/~kero0001/piezo/piezo4.pdf>

Anlagen

Piezoaktor..... A-I

Bewegungswandler..... A-III

Piezoaktor



Abbildung 32: Piezoelement mit Temperatursensor

Bewegungswandler

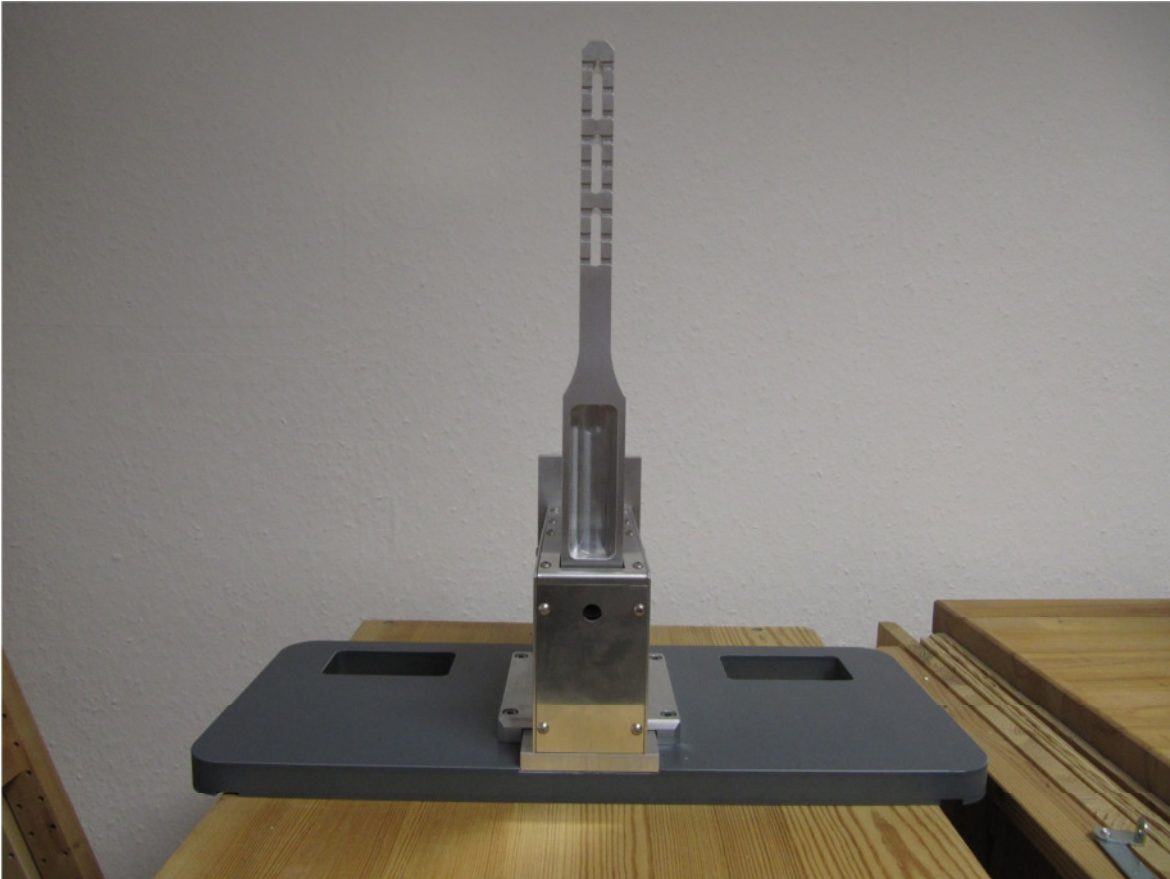


Abbildung 33: Kompletter Bewegungswandler mit Grundplatt

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 28. Juni 2013

Florian Weise